УДК 691.3 DOI: https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.70890

ВЛИЯНИЕ ВОЛОКНИСТЫХ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

Кандидаты техн. наук Т.А. Костюк, А.А. Плугин,
д-р техн. наук А.А. Плугин, инженеры В.А. Арутюнов, Н.Н. Партала, Ю.А. Суханова,
докт.-инж. Х.-Б. Фишер

ВПЛИВ ВОЛОКНИСТИХ НАПОВНЮВАЧІВ НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИТІВ

Кандидати техн. наук Т.О. Костюк, О.А. Плугін,
д-р техн. наук А.А. Плугін, інженери В.А. Арутюнов, Н.М. Партала, Ю.А. Суханова,
докт.-інж. Х.-Б. Фішер

INFLUENCE OF FIBER FILLERS TO PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF CEMENT COMPOSITES

Candidates of techn. sciences T.O. Kostiuk, O.A. Plugin,
doct. of techn. sciences A.A. Plugin, engineers V.A. Arutiunov, N.M. Partala and Yu.A. Sukhanova,
dr.-ing. Hans-Bertram Fischer

Выполнен анализ влияния волокнистых наполнителей – стеклянного, хризотилового, полиэфирного, полипропиленового на физико-механические свойства цементных композитов. Установлены закономерности влияния вида и модуля упругости волокон на модуль деформации, прочность и трещиностойкость композитов.

***Ключевые слова**: цементная композиция, волокнистый наполнитель, деформативность, прочность, трещиностойкость.*

Виконано аналіз впливу волокнистих наповнювачів – скляного, хризотилового, поліефірного, поліпропіленового на фізико-механічні властивості цементних композитів. Встановлено закономірності впливу виду і модуля пружності волокон на модуль деформації, міцність і тріщиностійкість композитів.

***Ключові слова**: цементна композиція, волокнистий наповнювач, деформативність, міцність, тріщиностійкість.*

The analysis of influence of fibrous fillers – glass, chrysotile, polyester, polypropylene on physical and mechanical properties of cement composites was done. The regularities of influence of type and elastic modulus of the fibers on deformation module, strength and crack resistance of the composites are determined.

***Keywords**: cement composites, fiber filler, deformability, strength, crack resistance.*

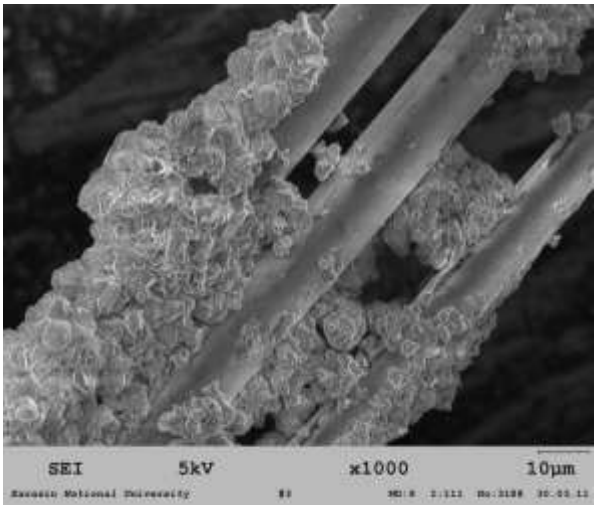
Актуальность темы и постановка проблемы. Наиболее распространенным способом улучшения физико-механических свойств цементных материалов для ремонтных и реставрационных работ – трещиностойкости, прочности на изгиб и растяжение, динамической прочности, стойкости к истиранию, износостойкости является введение волокнистых наполнителей. Однако используемые на практике зависимости этих характеристик от вида и количества наполнителей определяются преимущественно эмпирическим путем, что весьма трудоемко и не позволяет быстро перестраиваться на другие виды волокон. В [1–7] были выполнены теоретические и экспериментальные исследования зависимости ряда физико-механических характеристик цементных материалов от вида и физико-химических свойств волокнистых наполнителей. В [1; 3; 6] было показано, что стеклянное и полиэфирное волокно служат подложкой для продуктов гидратации цемента, которые совместно образуют непрерывную прочную структуру,

повышая прочность цементного камня на растяжение при изгибе до 16 МПа, а также его гидрофизических характеристик. Однако количественные зависимости деформативных и прочностных характеристик цементных композитов от вида и количества волокон остались недостаточно изученными и обоснованными.

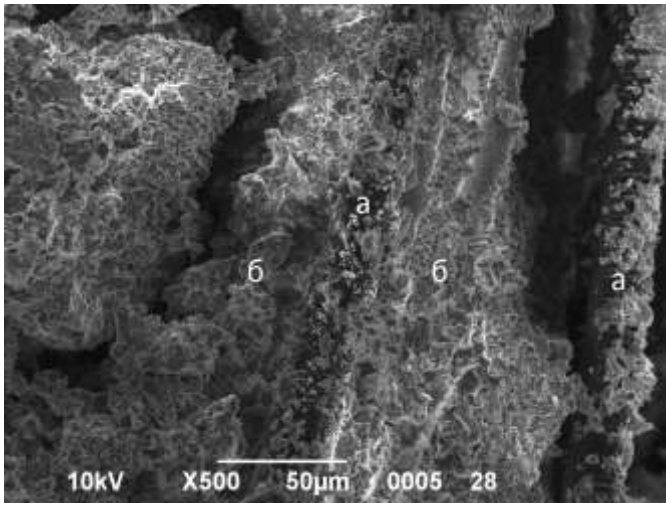
Цель и методика исследования – установление зависимостей деформативных и прочностных характеристик цементных композитов от вида и количества волокнистых наполнителей расчетно-аналитическими методами.

Основной материал исследования. На электронно-микроскопических снимках изотропных цементных композитов с волокнистыми наполнителями (рис. 1, *а*, *б*) видно, что фрагменты их структуры, ответственные за физико-механические свойства, возможно представить в виде сочетания параллельных колонн с различными деформативными характеристиками, как это представлено в [8] для композита, состоящего из цементного камня и заполнителей (рис. 1, *в*).

а)



б)



в)

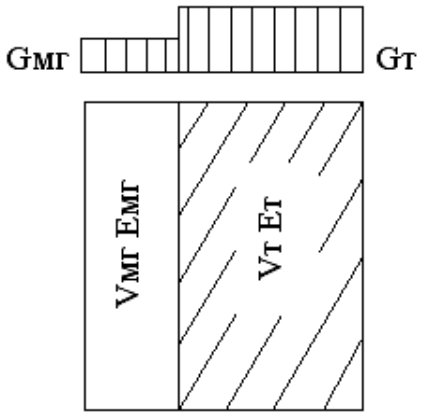


Рис. 1. Микроструктура цементного композита:
а, б – электронно-микроскопические снимки композитов со стеклянным (*а*) и полиэфирным (*б*) волокном (а – волокно; б – цементная матрица);
в – схема распределения объемов и напряжений в единичном объеме композита (Vмг – объем мягкого компонента, Vт – объем твердого компонента в композите)

Модуль упругости (деформации) композита в [8] предложено рассчитывать из условия:

$$\varepsilon = G_{мг}/E_{мг} = G_т/E_т\ , \qquad (1)$$

где ε – упругая деформация композита; $E_{мг}$ – модуль упругости мягкого компонента; $E_т$ – модуль упругости твердого компонента; $G_{мг}$ – напряжение в мягком компоненте; $G_т$ – напряжение в твердом компоненте.

При условии, что сумма сил в сечении должна быть равна общей внешней силе $G\times1$,

$$G_{мг}V_{мг} + G_тV_т = G\times1, \qquad (2)$$

где $V_{мг}$ – площадь поперечного сечения колонны, состоящей из мягкого компонента, равная относительному объему мягкого компонента; $V_т$ – площадь поперечного сечения колонны, состоящей из твердого компонента, равная относительному объему твердого компонента.

Из (1) и (2) получаем уравнение модуля упругости композита:

$$E = V_{мг}E_м + V_тE_т, \qquad (3)$$

Характер влияния волокнистых наполнителей на прочность композитов на сжатие может позволить оценить формула, предложенная Л.И. Онищиком [9] для бетонов на пористых и мягких заполнителях:

$$E = 4000\cdot\sqrt{R\rho^3} + 25000, \qquad (4)$$

где E – модуль упругости, кгс/см^2; R – прочность на сжатие, кгс/см^2; ρ – средняя плотность, т/м^3.

Преобразуем (3) для определения прочности в зависимости от модуля упругости:

$$R = [(E–25000)/4000)]^2/\rho^3. \qquad (5)$$

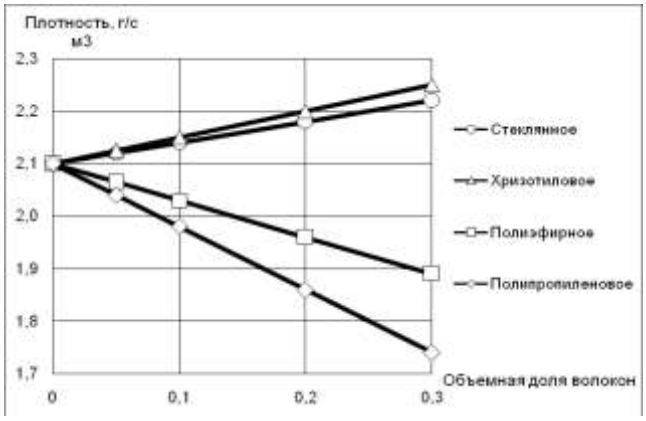
Модуль упругости цементного камня по данным разных авторов находится в пределах от 15000 [7] до 23000 [8] МПа. Значения модуля упругости волокон по данным разных источников приведены в табл. 1. Результаты расчета модуля деформации и прочности на сжатие по (3) и (5) приведены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 1

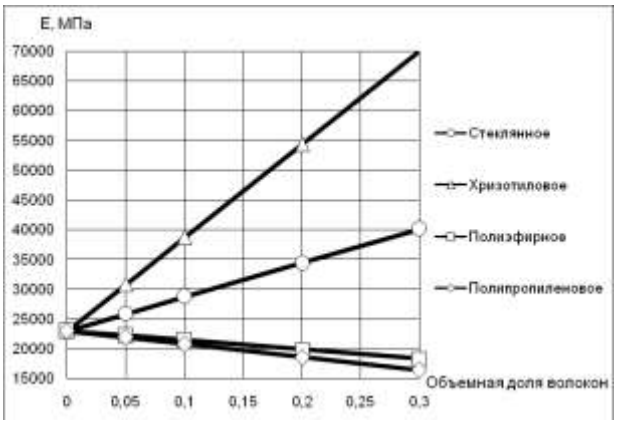
Модуль упругости и плотность волокон

Источник данных	Значения	Модуль упругости волокна				Плотность волокна, г/см^3			
		Стеклянного	Хризотилового	Полиэфирного	Полипропиленового	Стеклянного	Хризотилового	Полиэфирного	Полипропиленового
НИИпроектасбестцемент [9]	По данным источника	0,7x10^4 кгс/мм^2	(0,5–0,8)×10^4 кгс/мм^2	0,015×10^4 кгс/см^2	0,011×10^4 кгс/см^3	2,2–2,8	2,5	1,3–1,4	0,9
	Среднее, МПа	68600	63700	1470	1078	2,5		1,35	
Украинское хризотиловое объединение [10]	По данным источника	70-97 ГПа	164 ГПа	28 ГПа	8–200 ГПа	2,54–2,7	2,6	1,75	0,9
	Среднее, МПа	83500	164000	28000	104000	2,62			
Википедия и др. Интернет-ресурсы [11]	По данным источника	73-86 ГПа	175-210 ГПа	5-10 ГПа	6700–11900 кгс/см^2	2,5	2,6	1,4	0,93
	Среднее, МПа	79500	192500	7500	911				
Принятое в расчет		80000	180000	7500	1000	2,5	2,6	1,4	0,9

а)



б)



в)

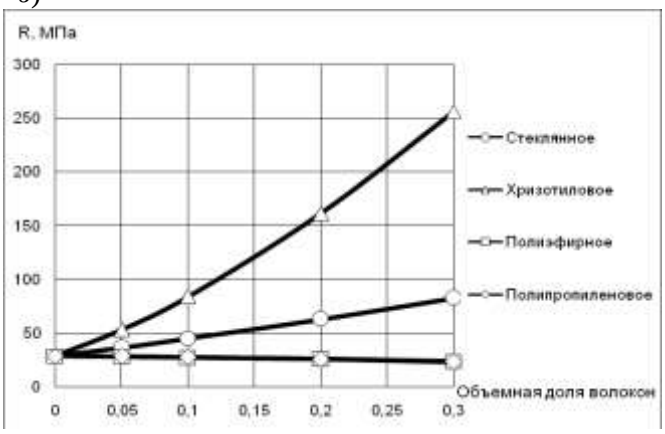


Рис. 2. Зависимость плотности (*а*), модуля упругости (*б*) и прочности на сжатие (*в*) цементной композиции от объемной доли волокнистого наполнителя

Из табл. 2 и рис. 2 видно, что введение в цементный камень волокнистых наполнителей с более высоким, чем у цементного камня, модулем упругости приводит к значительному увеличению модуля деформации и прочности композита. При этом повышение содержания наполнителя в исследуемом диапазоне также обеспечивает повышение модуля деформации и прочности. Введение в цементный камень волокнистых наполнителей с меньшим, чем у цементного камня модулем упругости, приводит к уменьшению модуля деформации и незначительному снижению прочности композита. Повышение содержания наполнителя в этом случае обусловливает снижение модуля деформации и незначительное снижение прочности композита. Таким образом, введение волокнистых наполнителей обеспечивает повышение трещиностойкости цементных композитов по различным механизмам: волокон с модулем упругости большим, чем у цементного камня – за счет повышения прочности на растяжение, а волокон с модулем упругости меньшим, чем у цементного камня – за счет увеличения податливости композита деформациям без разрушения, демпфированию.

Еще одним фактором, определяющим механизм повышения трещиностойкости, является наличие или отсутствие взаимодействия и контактов между продуктами гидратации цемента и поверхностью волокна. На рис. 3 приведены электронные микроснимки полиэфирных (*а*) и полипропиленовых (*б*) волокон, экспонированных в цементной вытяжке. Из рис. 3 видно, что на поверхности полиэфирных волокон образуется своеобразная обойма из продуктов гидратации цемента, тогда как на поверхности полипропиленового волокна продукты гидратации практически не отмечаются.

Таблица 2

Результаты расчетов модуля деформации и прочности на сжатие цементных композиций с волокнистыми наполнителями

Волокно (наполнитель)	Относительный объем		Плотность, т/м^3			Модуль упругости Е, МПа			Прочность композита *R*	
	Матрицы (цементного камня) $V_т$	Наполнителя Vмг	Матрицы (цементного камня)	Наполнителя	Композита	Матрицы (цементного камня)	Наполнителя	Композита	кгс/см^2	МПа
Стеклянное	1	0	2,1	2,5	2,10	23000	80000	23000	296,8	29,1
	0,95	0,05			2,12			25850	374,0	36,7
	0,9	0,1			2,14			28700	457,6	44,8
	0,8	0,2			2,18			34400	641,2	62,8
	0,7	0,3			2,22			40100	843,1	82,6
Хризотиловое	1	0		2,6	2,10		180000	23000	296,8	29,1
	0,95	0,05			2,13			30850	547,0	53,6
	0,9	0,1			2,15			38700	860,5	84,3
	0,8	0,2			2,20			54400	1 649,4	161,6
	0,7	0,3			2,25			70100	2 614,7	256,2
Полиэфирное	1	0		1,4	2,10		7500	23000	296,8	29,1
	0,95	0,05			2,07			22225	289,0	28,3
	0,9	0,1			2,03			21450	280,8	27,5
	0,8	0,2			1,96			19900	263,2	25,8
	0,7	0,3			1,89			18350	243,7	23,9
Полипропиленовое	1	0		0,9	2,10		1000	23000	296,8	29,1
	0,95	0,05			2,04			21900	290,0	28,4
	0,9	0,1			1,98			20800	282,3	27,7
	0,8	0,2			1,86			18600	263,8	25,8
	0,7	0,3			1,74			16400	240,4	23,6

а) *б*)

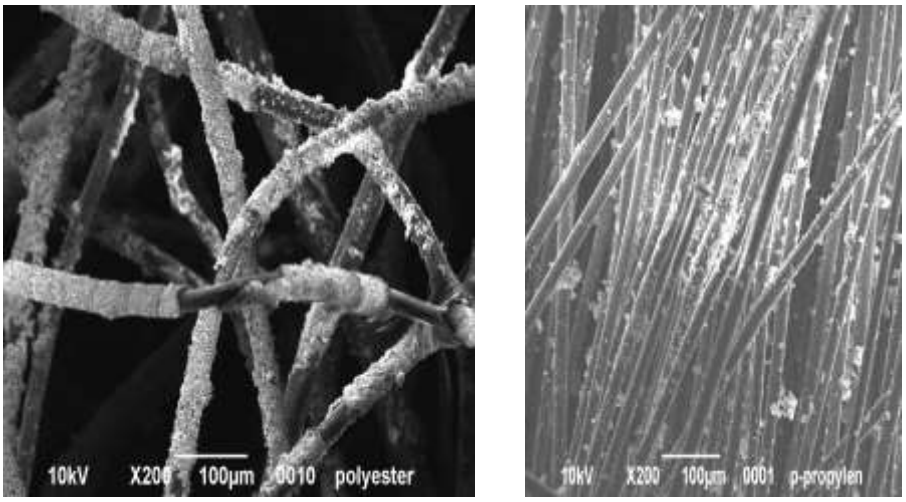


Рис. 3 Электронно-микроскопические снимки волокон, экспонированных в цементной вытяжке 28 суток: *а* – полиэфирного; *б* – полипропиленового

Выводы и рекомендации

1. Анализ влияния волокнистых наполнителей на физико-механические свойства цементных композитов показал, что введение в цементный камень волокнистых наполнителей с более высоким, чем у цементного камня, модулем упругости (стеклянных, хризотиловых) приводит к значительному увеличению модуля деформации и прочности композита. Введение в цементный камень волокнистых наполнителей с меньшим, чем у цементного камня модулем упругости (полиэфирных, полипропиленовых), приводит к уменьшению модуля деформации и незначительному снижению прочности композита. Таким образом, введение волокнистых наполнителей обеспечивает повышение трещиностойкости цементных композитов по различным механизмам: волокон с модулем упругости большим, чем у цементного камня – за счет повышения прочности на растяжение, а волокон с модулем упругости меньшим, чем у цементного камня – за счет увеличения податливости композита деформациям, демпфированию.

2. В результате электронно-микроскопических исследований установлено, что в цементных композициях обеспечивается хороший контакт продуктов гидратации цемента с поверхностьтю полиэфирного волокна, на которой образуется обойма из продуктов гидратации. На поверхности полипропиленового волокна продукты гидратации практически не отмечаются.

Список использованных источников

1. Арутюнов, В.А. Оценка возможности применения полиэфирной мокрофибры в гидроизоляционных составах на основе портландцемента [Текст] / В.А. Арутюнов, Т.А. Костюк, Д.А. Бондаренко, О.В. Старкова // Современный научный вестник. – Белгород: Руснаучкнига, 2013. - №32(171). – С. 109-116.

2. Плугин, А.А. Возможности применения полиэфирной микрофибры в гидроизоляционных цементных составах [Текст] / А.А. Плугин, В.А. Арутюнов, Т.А. Костюк, Д.А. Бондаренко // Materialy IX Mezinarodni vedecko-praktika conference «Dny vedy». – Praha: P.H.Education and Science s.r.o., 2013. – Dil.32. – С.79–85.

3. Плугин, А.А. Рулонный композиционный материал для ремонта и гидроизоляции бетонных, железобетонных и каменных конструкций и сооружений [Текст] / А.А. Плугин, В.А. Арутюнов, Т.А. Костюк, Н.М. Партала, Ю.А. Суханова // зб. наук. праць Української державної академії залізничного транспорту. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип.143. – С. 103–110.

4. Плугин, А.А. Изотропное микроармирование цементного камня продуктами гидратации для повышения физико-механических характеристик гидроизоляционных покрытий [Текст] / А.А. Плугин, М.Г. Салия, Т.А. Костюк // Вісник НТУ «ХПІ»: зб. наук. пр. Тематичний випуск «Хімія, хімічна технологія та екологія». − Харків: НТУ «ХПІ», 2011. − №50. – С. 97-103.

5. Арутюнов, В.А. Моделирование оптимальных гидроизоляционных составов интегрально-капиллярного действия с повышенным содержанием полимерных волокон [Текст] / В.А. Арутюнов, О.В. Старкова, Д.А. Бондаренко // Системи обробки інформації. – Харків: ХУПС, 2013. – Вип.5(112). – С.83-86.

6. Кагановский, А.С. Высокоэффективные композиционные материалы на основе минеральных и синтетических волокон: Проблемы производства хризотил-цемента [Текст] / А.С. Кагановский, О.В. Градобоев, Ал.А. Плугин // зб. наук. праць УкрДАЗТ. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 138. − С. 50-55.

7. Плугин, Ал.А. Высокоэффективные композиционные материалы на основе минеральных и синтетических волокон: Физико-химические свойства волокон [Текст] / Ал.А. Плугин, А.С. Кагановский, О.В. Градобоев, А.А. Плугин // Науковий вісник будівництва. − Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2014. − №2(76). − С.94-102.

8. Гансен, Т.К. Ползучесть и релаксация напряжений в бетоне [Текст] / Т.К Гансен. – М.: Госстройиздат, 1963. – 124 с.

9. Деформации // Baurum.ru. Строительство и ремонт [Електроний ресурс]. – Режим доступу: http://baurum.ru/alldays/?cat=concrete&id=3940.

10. Кузнецова, Т.В. Физическая химия вяжущих материалов [Текст]: учеб. для вузов / Т.В. Кузнецова, И.В. Кудряшов, В.В. Тимашев. – М.: Высш.шк., 1989. – 384 с.

11. Берг, О.Я. Высокопрочный бетон [Текст] / О.Я. Берг, Е.Н. Щербаков, Г.И. Писанко; под ред. О.Я. Берга. – М.: Стройиздат, 1971. – 208 с.

12. Нейман, С.М. О безопасности асбестоцементных материалов и изделий [Текст] / С.М. Нейман, А.И. Везенцев, С.В. Кашанский. – М.: РИФ Стройматериалы, 2006. – 64 с.

13. Волокнистые заменители асбеста и материалы на их основе // Асоціація «Українське хризотилове об'єднання» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: http://ukrchrysotile.com.ua/zameniteli_1.html.

14. Википедия. Свободная энциклопедия: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://ru.wikipedia.org/wiki/.

Костюк Тетяна Олександрівна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів і виробів, Харківський національний університет будівництва і архітектури. Тел. (057) 706 20 73; E-mail: office@kstuca.kharkov.ua; takostuk@ukr.net.

Плугін Олексій Андрійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Українська державна академія залізничного транспорту. Тел. (057) 730 10 68; E-mail: info@kart.edu.ua; plugin07@rambler.ru.

Плугін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор, зав. кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд УкрДАЗТ. Тел. (057) 730 10 63; тел./факс (057) 771 46 91; E-mail: info@kart.edu.ua; plugin_aa@kart.edu.ua

Арутюнов Валерій Ашотович, аспірант кафедри будівельних матеріалів і виробів, ХНУБА; E-mail: office@kstuca.kharkov.ua.

Партала Наталія Миколаївна, завідувач лабораторії кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд УкрДАЗТ. Тел. (057) 730 10 63; E-mail: info@kart.edu.ua; natabim@rambler.ru.

Суханова Юлія Андріївна, провідний інженер, ТОВ «Гідротехпроект». Тел./факс (095) 043 88 38; E-mail: jvine@mail.ru.

Ханс-Бертрам Фішер, доктор-інженер, керівник дослідницької групи будівельного факультету університету Баухаус, Веймар, Німеччина. Тел.: +49 (0) 3643/584712, E-Mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de.

Kostuk Tatiana A., cand. of techn. science, docent of Bbuilding Materials and Ware Department, Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture (KNUCEA); tel. (38 057) 706 20 73; E-mail: office@kstuca.kharkov.ua; takostuk@ukr.net.

Plugin Olrksii A., cand. of techn. sciences, docent of Building Materials, Constructions and Buildings Department, Ukrainian State Academy of Railway Transport (UkrSART); tel. (38 057) 730 10 68; E-mail: info@kart.edu.ua; plugin07@rambler.ru.

Plugin Andrii A., doct. of techn. sciences, professor, head of Building Materials, Constructions and Buildings Department of Ukrainian State Academy of Railway Transport (UkrSART); тел. (38 057) 730 10 63; тел./факс (38 057) 771 46 91; E-mail: info@kart.edu.ua; plugin_aa@kart.edu.ua.

Arutiunov Valerii A., postgraduate student, building materials and ware department, KNUCEA; E-mail: office@kstuca.kharkov.ua.

Partala Natalia M., head of learning laboratory of building materials, constructions and buildings, UkrSART; tel. (38 057) 730 10 63; E-mail: info@kart.edu.ua; natabim@rambler.ru.

Sukhanova Yulia A., leading engineer, Design and Research Institute «Hydrotechproject»; tel. (095) 043 88 38; E-mail: jvine@mail.ru.

Hans-Bertram Fischer, Dr.-Ing., Head of Working Group, Faculty of Civil Engineering, Bauhaus-Universität Weimar, Coudraystraße 11B, Raum 105 Tel.: +49 (0) 3643/584712, E-Mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de.