

Н. І. Сидор, У. Д. Марущак, І. В. Маргаль
 Національний університет “Львівська політехніка”,
 кафедра будівельного виробництва

ВПЛИВ КОМПОНЕНТНОГО СКЛАДУ НА ВЛАСТИВОСТІ ІНЖЕНЕРНИХ ЦЕМЕНТУЮЧИХ КОМПОЗИТІВ

© Сидор Н.І., Марущак У. Д., Маргаль І. В., 2018

Застосування інженерних цементуючих композитів (ЕСС) – спеціально розробленого класу дисперсно-армованих матеріалів на основі портландцементу – дає змогу підвищити несучу здатність, стабільність при різних статичних та динамічних впливах, а також довговічність будівельних конструкцій завдяки контрольованому процесу тріщиноутворення. Проте в ЕСС використовують значну кількість цементуючих матеріалів, часто до 70 %, що призводить до суттєвих деформацій усадки, обмеження стабільності розмірів та зростання вартості матеріалу. Досліджено реологічні та міцнісні показники інженерних цементуючих композитів на основі бінарної та потрійних в'язучих систем за варіювання вмісту дисперсних волокон. Показано, що часткова заміна золи винесення ультрадисперсними мінеральними добавками з підвищеною поверхневою енергією у складі потрійної в'язучої системи, використання полікарбоксилатного суперпластифікатора, а також армування структури інженерних композитів дисперсними волокнами в оптимальній кількості підвищують їхні фізико-механічні властивості як у ранній, так і в пізніші терміни тверднення порівняно з композитами на основі бінарної в'язучої системи. З використанням комплексу мінеральних добавок, що забезпечує щільне упакування частинок, ранню пуцоланову реакцію з одержанням додаткових продуктів гідратації, коефіцієнт тріщиностійкості зростає до 0,227–0,240 порівняно з 0,216 для ЕСС на основі бінарної в'язучої системи.

Ключові слова: інженерний цементуючий композит, ультрадисперсні мінеральні добавки, тріщиноутворення, дисперсне армування, міцність.

N. Sydor, U. Marushchak, I. Margal
 Lviv Polytechnic National University,
 Department of construction production

EFFECT OF COMPONENT COMPOSITION ON PROPERTIES OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES

© Sydor N., Marushchak U., Margal I., 2018

The application of engineering cementitious composites (ECC) – a specially developed class of cement-based material reinforced with fibers – allows to enhance the loading capacity, stability under static and dynamic influences, as well as durability of building structures due to controlled cracking process. The design of engineering cementitious composites is based on the concept of micromechanics, which includes the strength and energy criteria of deformation strengthening throughout the wide range from the macro- to the nanostructural level. This concept based on the ability of the dispersed fibers to perceive the load and absorb energy. However, the high volume of cementitious materials in ECC, often up to 70 %, results in a large drying shrinkage, limitation on dimensional stability and negative effects on material cost. The flowability and strength of engineered cementitious composites based on binary and ternary systems of binder materials with different content of dispersed fibers are researched. It is established that an increasing of fiber amount leads to a significant reduction in the flowability of cementitious composites, so the fiber content of 1.5–2 % is optimal. When the

disperse fibers are introduced, part of it works on tension, and some of it prevents particle displacement, ensuring the integrity of the system under the action of external loading. It is shown that the combination of fly ash and ultrafine mineral additives with high surface energy in the ternary system of binder materials, the use of polycarboxylate superplasticizer, as well as reinforcement of the engineered composites structure with dispersed fibers in optimum amounts contribute to their mechanical properties both at an early and later hardening period compared to composites based on binary system of binder materials. With the use of a complex of mineral additives that provides a dense packing of particles, filling space between cement grains, an early pozzolanic reaction, obtaining of additional hydration products, the coefficient of crack resistance increases to 0.227-0.240 compared with 0.216 for the ECC based on the binary system of binder materials.

Key words: engineered cementitious composite, ultrafine mineral additive, crack formation, dispersed reinforcement, strength.

Постановка проблеми. З розвитком будівництва бетон став найпопулярнішим будівельним матеріалом завдяки універсальності, довговічності, зручності у використанні та доступності вихідних матеріалів. У світі щорічно виробляється понад 11,4 млрд. тонн бетону. Розвиток технологій будівництва потребує постійного вдосконалення бетону, зокрема підвищення його міцності, що зумовлено розширенням функціональних можливостей. Разом з тим, у міру збільшення міцності на стиск зростає крихкість будівельних композитів. Це створює небезпеку і обмеження використання високоміцного бетону в конструктивних цілях і вимагає розроблення заходів з підвищення його тріщиностійкості. Тому поряд з традиційним залізобетоном все більшого застосування набувають конструкції на основі модифікованого фібробетону з підвищеними експлуатаційними характеристиками, технологія яких ґрунтується на введенні функціональних добавок та дисперсного армування фіброю різного виду [1–3]. Інноваційним напрямком розвитку матеріалів, які здатні вирішити проблеми тріщиностійкості, підвищення ударної в'язкості за статичних та динамічних навантажень є створення інженерних цементуючих композитів – engineered cementitious composites (ECC).

Аналіз публікацій. Високоміцний бетон є крихким матеріалом, в якому під час навантажень локалізується деформація в місці прояву першої тріщини після граничного навантаження. При цьому розсіюється деформація як від механічних навантажень, так і від внутрішніх напружень [1, 4].

Тріщиноутворення в конструкціях знижує їх несучу здатність, а також корозійну стійкість, підвищує можливість проникнення води та інших хімічних речовин, що може призводити до зниження довговічності композитів. Для ефективного вирішення цієї проблеми розроблено унікальний клас високоефективних цементуючих композитів, армованих фіброю – engineered cementitious composites (ECC або ECC Concrete), які характеризуються високими показниками міцності при розтягу, стійкістю до тріщиноутворення та довговічністю [5–7].

Інженерні цементуючі композити з часу їхнього створення в локальних цілях перетворилися на клас особливих композитів з широким спектром областей застосувань, зокрема класичні, призначені для використання в тонкостінних конструкціях, дамбах, під час ремонтних робіт; самоущільнювальні – для бетонування складних конструкцій, реконструкції; торкрет-композитні – для прокладання і підсилення тунелів, колекторів, систем каналізацій; екструдовані – для формування труб високої стійкості і гнучкості; швидкотверднучі – для застосування в ремонтних та відновлювальних роботах [6, 8].

Проектування інженерних будівельних композитів ґрунтується на концепції мікромеханіки, що передбачає міцнісний та енергетичний критерії деформаційного зміцнення у всьому масштабному діапазоні від макро- до наноструктурного рівня, в основу яких покладено можливості дисперсних волокон сприймати навантаження та поглинати енергію [7]. Мікромеханічний підхід до розроблення будівельних композитів пов'язаний з оптимізацією компонентного складу та мікроструктури матеріалу з врахуванням взаємодії між волокном, цементуючою матрицею та

поверхнею поділу волоконно-матричного матеріалу, що забезпечує зшивання структури та дає змогу контролювати тріщиноутворення з виникненням не однієї макротріщини, а множинних мікротріщин під час непружного процесу деформації [9].

Ефект дисперсного армування залежить від структури, міцності матриці, а також від параметрів волокон та їхніх властивостей. При введенні дисперсної фібри частина її працює на розтяг, а частина перешкоджає зсуву частинок, забезпечуючи цілісність системи. Мінеральні і металеві волокна, розташовані паралельно до діючого зовнішнього навантаження, підсилюють жорсткість системи. Органічні волокна мають низький модуль пружності і перешкоджають зсуву частинок, знижуючи виникаючі вторинні напруження [1, 2].

Автори [10] показали, що міцність при стиску бетону не залежить істотно від довжини фібри, а лише від її кількості в суміші. При цьому міцність на згин бетону визначається довжиною дисперсної фібри, і найбільшого її значення досягають за армування розтягнутої частини довгою фіброю, а стисненої частини – короткою фіброю. При цьому деформаційне зміцнення ЕСС забезпечують мінімізацією вмісту волокна, оскільки використання фібри понад критичне значення підвищує вартість та ускладнює оброблення матеріалів.

Для контролю реологічних властивостей суміші ЕСС використовують високоефективні суперпластифікатори на меланінформальдегідній та полікарбоксилатній основі, що дає змогу знизити пористість, підвищити міцність та водонепроникність композитів [5].

Багаторазове тріщиноутворення (multiple cracking) у матриці спричиняють відсутність крупного заповнювача та застосування обмеженої кількості дрібного піску, оскільки це призводить до зростання ширини тріщин. Такі особливості складу підвищують витрати цементу в ЕСС, що зумовлює зростання повзучості та тріщиноутворення внаслідок збільшення тепловиділення й усадки, особливо за підвищеної рухливості бетонних сумішей [6].

Модель мікромеханіки передбачає використання золи виносення для зменшення витрати в'язучого. Разом з тим, введення золи виносення внаслідок низької реакційної здатності призводить до зниження міцності як в ранні, так і пізні терміни тверднення, що зумовлює застосування ультрадисперсних активних мінеральних добавок з підвищеною пуцолановою активністю, зокрема мікрокремнезему, метакаоліну. Їх позитивний вплив на мікроструктуру та властивості матеріалів на основі портландцементу зумовлюється збільшенням в'язкості рідкої фази з підвищенням стійкості до розшарування і покращенням легковкладальності системи; заповненням порожнин між зернами цементу, зв'язуванням вільної води; прискоренням процесу гідратації, взаємодією $\text{Ca}(\text{OH})_2$ з утворенням гідросилікатів кальцію [3, 11]. Тому значний практичний інтерес становлять дослідження, спрямовані на визначення оптимальної кількості фібри, а також можливості часткової заміни золи виносення на ультрадисперсні мінеральні добавки у складі в'язучої системи інженерних цементуючих композитів.

Мета статті. Дослідити реологічні та міцнісні показники інженерних цементуючих композитів на основі бінарної та потрійних в'язучих систем за варіювання вмісту дисперсних волокон.

Матеріали та методи досліджень. Для приготування інженерних цементуючих композитів використано портландцемент ПЦ І-500Р ПрАТ "Івано-Франківськцемент", ультрадисперсні активні мінеральні добавки: золу виносення, мікрокремнезем та метакаолін, заповнювач – природний кварцовий пісок Рогатинського родовища ($M_k=1,09$). Для дисперсного армування застосовано поліпропіленову фібру завдовжки 5 мм. Як модифікатор реологічних властивостей композитів використано суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Glenium ACE430.

Співвідношення компонентів ЕСС наведено в табл. 1. Бінарна в'язуча система містила портландцемент та золу виносення за вмісту мінерального компонента 55 %. У потрійній системі 20 % золи виносення замінено мікрокремнеземом (склад 2) та метакаоліном (склад 3). Дозування суперпластифікатора Glenium ACE430 у всіх складах становило 0,7 мас.% від в'язучого, ступінь армування фіброю коливався в межах 0,5 %–3,0 мас.%.

Склади інженерних цементуючих композитів

Компонент	Співвідношення матеріалів		
	Склад 1	Склад 2	Склад 3
ПЦ-I 500	1	33,1	33,1
Зола-винесення	1,22	0,78	0,78
Мікрокремнезем	-	0,44	-
Метакаолін	-	-	0,44
Пісок	0,8	0,8	0,8
Вода	0,24	0,32	0,26

Рухливість цементно-піщаного розчину визначали на струшувальному столику згідно з ДСТУ Б В.2.7-187:2009. Для визначення міцності композитів формували зразки-балочки розміром 2x2x8 см. Зразки тверднули у нормальних умовах (температура 20 ± 2 °С, відносна вологість 95 ± 5 %).

Результати досліджень. Аналіз впливу вмісту поліпропіленової фібри на рухливість будівельних композитів свідчить, що збільшення кількості фібри від 0,5 до 3,0 % призводить до зменшення розпливу конуса за незмінного водов'язучого відношення (табл. 2), що спричинене структуруванням суміші волокнами, необхідністю підвищення кількості води для змочування поверхні фібри. Оптимальний вміст фібри у складі ЕСС становить 1,5–2 %, а суміші композитів з вмістом фібри 3,0 мас.% є нетехнологічними.

Таблиця 2

Рухливість цементуючих композитів

Вміст фібри, мас.%	Розплив конуса, мм		
	Склад 1	Склад 2	Склад 3
0,5	340	210	200
1,0	300	185	190
1,5	205	170	170
2,0	140	160	140
2,5	124	152	120
3,0	107	115	112

Як видно з рис. 1, збільшення вмісту фібри забезпечує зростання міцності на згин для всіх складів. Рання міцність на згин композиту складу 1 зі збільшенням кількості фібри від 0,5 до 3,0 % зростає на 13 %.

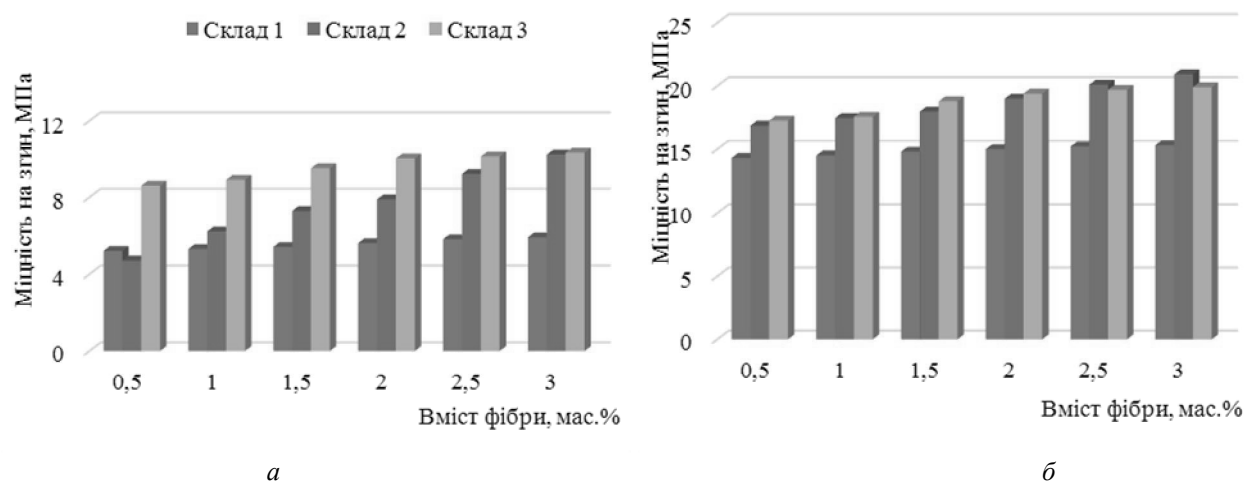


Рис. 1. Міцність на згин ЕСС через: а – 2 доби; б – 28 діб

Заміна частини золи винесення на ультрадисперсні добавки з підвищеною поверхневою активністю: мікрокремнезем і метакаолін – призводить до зростання міцності на згин внаслідок швидкого утворення продуктів гідратації волокнистого габітусу, що армують матрицю на мікро- та нанорівні. Так, приріст міцності через 2 доби композитів складів 2 і 3 становить 117 % і 20 % відповідно порівняно зі складом 1. Через 28 днів (рис. 1, б) найвищим показником міцності характеризується склад 2 з 3 % фібри – 20,9 МПа, що на 37 % перевищує міцність складу 1. Міцність складу 3, армованого 3 % фібри, зростає на 30 % порівняно зі складом 1 і становить 19,9 МПа.

Із збільшенням дозування фібри від 0,5 до 3,0 мас.% міцність на стиск складу 1 у ранній період майже не змінюється, і приріст міцності композиту, армованого 3 % фібри, становить 104 %, тоді як рання міцність складів 2 і 3 за ступеня армування 3,0 % зростає на 26 % і 16 % відповідно порівняно з ЕСС, армованими 0,5 % фібри (рис. 2, а).

ЕСС складу 1 характеризується найнижчими показниками міцності на стиск через 28 днів (64,2–66,7 МПа). При цьому композит складу 2 з 1,5 % фібри характеризується міцністю на стиск через 28 днів на рівні 83,3 МПа, що на 28 % перевищує міцність складу 1. За часткової заміни золи винесення на метакаолін показники міцності через 28 днів ЕСС з 1,5 % фібри становлять 78,3 МПа.

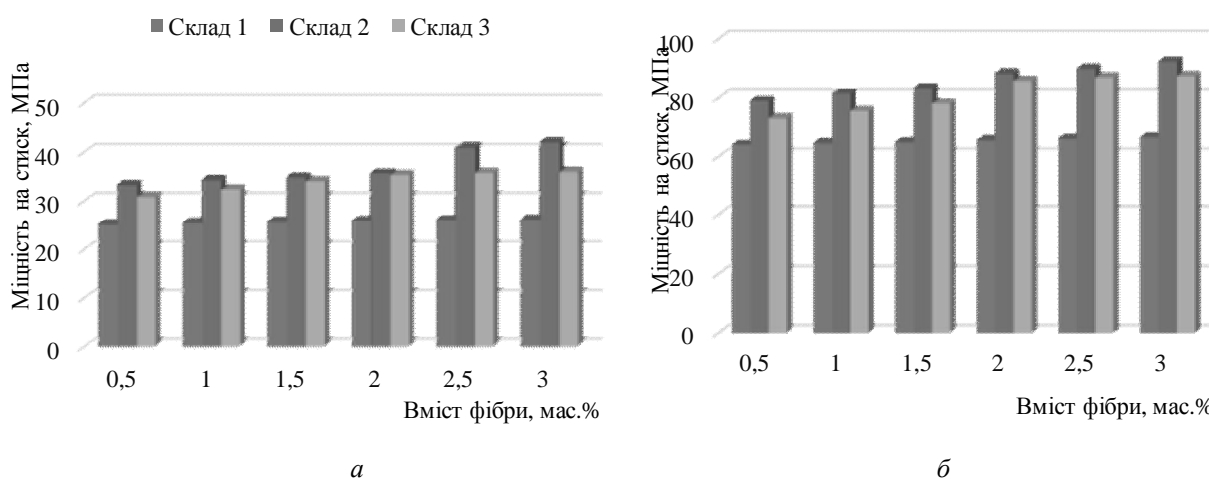


Рис. 2. Міцність на стиск ЕСС через: а – 2 доби; б – 28 днів

Для оцінювання ефективності впливу армувальних компонентів розраховано умовний коефіцієнт тріщиностійкості інженерних цементуючих композитів як відношення міцності на згин до міцності на стиск. Зі збільшенням вмісту фібри цей показник зростає для всіх складів. За дозування фібри 1,5 % найвищим коефіцієнтом тріщиностійкості характеризується композит складу 3 – 0,240, для складів 1 і 2 він становить 0,216 і 0,227 відповідно.

Висновки. Часткова заміна золи винесення ультрадисперсними мінеральними добавками з підвищеною поверхневою енергією у складі потрійної в'язучої системи використання полікарбоксилатного суперпластифікатора, а також армування структури інженерних композитів дисперсними волокнами в оптимальній кількості сприяють підвищенню їхніх фізико-механічних властивостей як у ранній, так і пізніші терміни тверднення порівняно з композитами на основі бінарної в'язучої системи. З використанням комплексу мінеральних добавок, що забезпечує щільне упакування частинок, ранню пуцоланову реакцію з одержанням додаткових продуктів гідратації, коефіцієнт тріщиностійкості зростає до 0,227–0,240 порівняно з 0,216 для ЕСС на основі бінарної в'язучої системи.

Постановку завдання та формулювання основних положень проводили під керівництвом д-ра т.ехн. наук, професора М. А. Саницького.

1. *Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія* / [Л. Є. Дворкін, Є. М. Бабич, В. В. Житковський та ін.]. – Рівне: НУВГП, 2017. – 331 с. 2. *Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем* / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин // *Будівельні матеріали і виробы*, 2015. № 1. С. 10–14. 3. *Дослідження*

тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленовою фіброю для дорожнього будівництва / [С. Й. Солодкий, В. О. Каганов, І. Б. Горніковська, Ю. В. Турба] // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – № 4/5 (76). – С. 40–46. 4. Суханов В. Г. Структура матеріала в структурі конструкції / В. Г. Суханов, В. Н. Вывовой, О. А. Коробко. – Одеса: Поліграф, 2016. – 244 с. 5. Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers / [Yu K., Jiangtao Y., Dai J.-G. et al.] // Construction and Building Materials. – 2018. – No. 158. – P. 217–227. 6. Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage / J. Zhang, Ch. Gong, Z. Guo, M. Zhang // Cement and Concrete Research. – 2009. – No. 39. – P. 303–312. 7. Li V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC). A review of the material and its applications / V. C. Li // Journal of Advanced Concrete Technology. – 2003. – Vol. 1. – No. 3. – P. 215–230. 8. Marushchak U. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction / U. Marushchak, M. Sanytsky, N. Sydor // SSP – Journal of Civil Engineering. – 2017. – Vol. 12 – Issue 2. – P. 107–112. 9. Sakulich A. R. Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC) / A. R. Sakulich, V. C. Li // Cement and Concrete Research. – 2011. – No. 41. – P. 169–175. 10. Дисперсное армирование – способ повышения прочности изделий / [В. Н. Деревянко, О. В. Шаповалова, Н. В. Кондратьева, А. А. Максименко] // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2015. – No. 3 (204). – С. 10–19. 11. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength / [Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Yu.] // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2016. – No. 6/6 (84). – P. 50–57.

References

1. Dvorkin L. Y., Babych Y. M., Zhytkovsky V. V., Bordyuzhenko O. M., Filipchuk S. V., Kochkarov D. V., Kovalyk I. V., Kovalchuk T. V., Skrypyuk M. M. (2017) Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony. [High-strength rapid hardening concretes and fiber reinforced concretes]. Rivne, NUVGP, 331 p. [in Ukrainian]. 2. Sanytsky M., Marushchak U., I. Kirakevych, M. Stechyshyn. (2015) Vysokomitsni samoushchilniivalni betony na osnovi dyspersno-armovanykh cementuuchykh system. [High-strength self-compacting concrete based on dispersion-reinforced cementing systems]. Budivelni materialy ta vyroby. № 1. S. 10–14. [in Ukrainian]. 3. Solodky S. Y., Kahanov V. O., Hornikovska I. B., Turba Yu. V. (2015) Doslidzhennia trishchynostiykosti vazhkykh betoniv ta pinobetoniv, armovanykh polipropilenovoyu fibroyu dlia dorozhniogo budivnytstva. [A study of the cracking properties of normal weight concrete and foam concrete reinforced with polypropylene fiber for road construction.]. Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tehnologiy – Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. no 4/5 (76), pp. 40–46. [in Ukrainian]. 4. Suhanov V. G., Vyrovoy V. N., Korobko O. A. (2016) Struktura materiala v strukture konstruksui. [Structure of material in construction structure]. Odessa, Poligraf, 244 p. [in Russian]. 5. Yu K., Jiangtao Y., Dai J.-G., Lu Z.-D., Shah S. P. (2018) Development of ultra-high performance engineered cementitious composites using polyethylene (PE) fibers. Construction and Building Materials. no 158, pp. 217–227. 6. Zhang J., Gong C., Guo Z., Zhang M. (2009) Engineered cementitious composite with characteristic of low drying shrinkage. Cement and Concrete Research. no 39, pp. 303–312. 7. Li V. C. On Engineered Cementitious Composites (ECC). A review of the material and its applications. Journal of Advanced Concrete Technology. 2003, Vol. 1, No. 3, pp. 215–230. 8. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. (2017) Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction. SSP – Journal of Civil Engineering. Vol. 12, Issue 2, pp. 107–112. 9. Sakulich A. R., Li V. C. (2011) Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC). Cement and Concrete Research. no 41, pp. 169–175. 10. Derevyanko V. N., Shapovalova O. V., Kondratieva N. V., Maksimenko A. A. (2015) Dispersnoye armirovaniye – sposob povysheniya prochnosti izdeliy. [Disperse reinforcement is method of strength increasing of wares]. Visnyk Prydniprovskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arhitektury – Pridneprovsk State Academy of Civil engineering and Architecture, no 3 (204), pp. 10–19. [in Russian]. 11. Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Yu. (2016) Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. no 6/6 (84), pp. 50–57.