

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ІНЖЕНЕРНИХ ЦЕМЕНТУЮЧИХ КОМПОЗИТІВ

© Сидор Н. І., 2019

Підвищення фізико-механічних властивостей та тріщиностійкості цементуючих композитів при експлуатації будівель та споруд є актуальною проблемою в інженерній практиці. З цією метою розроблено спеціальний клас дисперсно-армованих матеріалів – інженерні цементуючі композити (engineered cementitious composites – ECC). У статті показано, що із застосуванням дисперсних волокон можна збільшити міцність на згин ECC на 40 %, а додаткова заміна золи виносення на метакаолін – ще на 23 %. Стандартна міцність на стиск модифікованих цементуючих композитів становить 86,7 МПа. Доведено, що дисперсне армування поліпропіленою фіброю та часткова заміна золи виносення метакаоліном підвищує тріщиностійкість композитів, оцінену за критичним коефіцієнтом інтенсивності напружень, через 7 та 28 діб у 1,2 разу порівняно зі складом без метакаоліну. Розроблені інженерні цементуючі композити з добавкою метакаоліну характеризуються зменшенням відкритої пористості на 35 %, умовного коефіцієнта розміру пор у 3,4 разу порівняно з базовим композитом.

**Ключові слова:** інженерні цементуючі композити, мінеральна добавка, в'язкість руйнування, дисперсне армування, міцність.

N. I. Sydor

Lviv Polytechnic National University  
Department of construction production

## INVESTIGATION OF ENGINEERED CEMENTITIOUS COMPOSITES PROPERTIES

© Sydor N. I., 2019

Concrete is the most widely used building material due to its versatility, durability and availability of raw materials. With the development of the construction industry requirements to concrete, in particular their strength, are increased. Increasing of the physical and mechanical properties and crack resistance of cementitious composites during the operation of buildings and structures is an actual problem in engineering practice. A special class of fiber reinforced materials – engineered cementitious composites (ECC) has been developed for this purpose. The article shows that the use of polypropylene fibers can increase the flexural strength of the ECC by 40 %. Additional replacement of the fly ash on metakaolin and use of fibers is caused increase of the flexural strength of the ECC by 23 % compared to ECC without metakaolin. The standard compressive strength of modified cementitious composites is 86.7 MPa. After firsts cracking, tensile load-carrying capacity continues to increase, resulting in strain-hardening accompanied by multiple cracking. In order to obtain such behavior ECC is designed in accordance with the micromechanics theory which based on the optimization of component composition and microstructure of the material, taking into account the interaction between the fiber, the cement matrix and the transmission zone of the fiber-matrix material. It is proved that fiber reinforcement with polypropylene fiber and partial replacement of fly ash with metakaolin can increase the crack resistance of composites, estimated at critical intensity

**of stresses, after 7 and 28 days in 1,2 times compared to the composition without metakaolin. Indicators of strength of building composites are directly related to their structure, which is determined by of porosity. The developed engineered cementitious composites with metakaolin are characterized by a decrease of the open porosity by 35 %, a pore size ratio of 3.4 times compared to the base composites.**

**Key words: engineered cementitious composites, mineral additive, crack resistance, fiber reinforcement, strength.**

**Постановка проблеми.** Бетон є найпоширенішим будівельним матеріалом завдяки своїй універсальності, довговічності та доступності сировини. Із розвитком будівельної галузі підвищуються вимоги до композитів, зокрема їхньої міцності. Проте зі збільшенням міцності бетону зростає його крихкість та знижується в'язкість руйнування (тріщиностійкість). Тому, незважаючи на високу міцність бетону на стиск, в будівельних конструкціях при граничних навантаженнях можуть виникати тріщини, що зумовлює потенційну небезпеку і обмеження застосування високоміцних бетонів в екстремальних умовах експлуатації. Однією з важливих вимог до бетонних конструкцій є забезпечення їх тріщиностійкості (без погіршення інших характеристик – таких, як міцність на стиск і довговічність відповідно до сталого розвитку). Розроблення унікального класу високоефективних дисперсно-армованих будівельних матеріалів – інженерних цементуючих композитів (engineered cementitious composites – ЕСС), які характеризуються високою міцністю на розтяг, тріщиностійкістю та довговічністю, забезпечує ці вимоги. Тому розроблення і дослідження ЕСС є одним з актуальних напрямків будівельної галузі.

**Аналіз публікацій.** В'язкість руйнування бетону визначається його здатністю чинити опір початку руху і розвитку тріщин при механічних та інших впливах. При граничних навантаженнях у високоміцному бетоні деформації від механічних навантажень і внутрішніх напружень локалізуються у місці, де з'явилася перша тріщина [1, 2]. Утворення тріщин знижує несучу здатність та корозійну стійкість бетонних та залізобетонних конструкцій, збільшує ймовірність проникнення води чи інших речовин у конструкцію, що може спричинити погіршення показників довговічності конструкції. Для вирішення цієї проблеми розроблено клас дисперсно-армованих будівельних композитів ЕСС [3–5], які з розвитком будівництва еволюціонували з вузько застосовуваних у клас будівельних композитів із широкою областю застосування: від тонкостінних конструкцій до тунелів, колекторів тощо [4, 6].

Концепція ЕСС ґрунтується на теорії мікромеханіки, яка передбачає оптимізацію компонентного складу і мікроструктури матеріалу з врахуванням взаємодії волокон, цементної матриці, поверхні розділу волоконно-матричного матеріалу, що забезпечує зшивання структури. При цьому після появи першої тріщини несуча здатність ЕСС не змінюється, що призводить до деформаційного зміцнення, яке супроводжується множинним тріщиноутворенням (multiple cracking). Для контролю цього процесу в інженерних цементуючих композитах не застосовують крупний заповнювач, а також обмежена кількість дрібного заповнювача [7, 8], оскільки вони призводять до збільшення ширини розкриття тріщин. Разом з тим, підвищена витрата цементу в складі ЕСС порівняно з бетонами може призводити до збільшення тріщиноутворення, що зумовлене підвищеним тепловиділенням і усадкою [4].

Зменшення показників тепловиділення і усадки забезпечується завдяки використанню різних мінеральних добавок для часткової заміни цементу, зокрема золи винесення. Проте, зола винесення характеризується низькою реакційною здатністю, тому введення її до складу композиту знижує міцність в ранні та пізні терміни тверднення. Тому перспективним напрямком є використання ультрадисперсних мінеральних добавок, які характеризуються високою питомою поверхнею, що зумовлює заповнення порожнин між зернами цементу з ущільненням структури, зростання швидкості пуцоланової реакції з додатковим утворенням гідратних фаз у неклінкерній частині в'язучого та сприяє синтезу міцності цементної матриці у ранні терміни тверднення [9, 10].

Ефект множинного тріщиноутворення забезпечується також дисперсним армуванням. Фібра у композитах працює на розтяг або перешкоджає зсуву, забезпечуючи цілісність системи. Мінеральні і металеві волокна, розташовані паралельно до діючого зовнішнього навантаження, підсилюють жорсткість системи, проте технологічно важко забезпечити таке їх розміщення. Поліпропіленова фібра характеризується низьким модулем пружності, тому перешкоджає зсуву частинок і гасить вторинні виникаючі напруження [1, 11]. Для контролю реологічних властивостей суміші ЕСС використовують вискоефективні суперпластифікатори на полікарбоксилатній основі, що дає змогу знизити пористість, підвищити міцність та водонепроникність композитів [3].

**Мета дослідження.** Дослідити вплив компонентного складу на будівельно-технічні властивості інженерних цементуючих композитів.

**Матеріали та методи досліджень.** Для приготування інженерних цементуючих композитів використовували портландцемент ПЦ І-500Р ПрАТ “Івано-Франківськцемент”, мінеральні добавки – зола-винесення та метакаолін, дрібний заповнювач – природний кварцовий пісок Рогатинського родовища ( $M_k=1,08$ ). Питома поверхня мінеральних добавок становить 380 та 1300 м<sup>2</sup>/кг відповідно для золи-винесення та метакаоліну. Коефіцієнт пуцоланічності, визначений згідно з EN450-1, через 28 діб становить: для золи винесення – 0,94, для метакаоліну – 1,06. Як модифікатор реологічних властивостей ЕСС використано суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Glenium ACE430 у кількості 0,7 мас.%. Для оцінювання ефективності дисперсного армування розроблено склад 1 без фібри. У складі 2 для дисперсного армування застосовано поліпропіленову фібру із довжиною волокон 5 мм у кількості 1,5 % від маси в’язучого [13]. Співвідношення компонентів інженерних цементуючих композитів наведено на рис. 1. У складі 3 частину золи винесення (10 мас.%) замінено активнішою добавкою – метакаоліном. Для забезпечення високої технологічності суміші на основі ЕСС (розплив конуса становить 180–200 мм) водов’язуче відношення регулювали від 0,22 для складу 1 до 0,29 для складів 2 і 3.

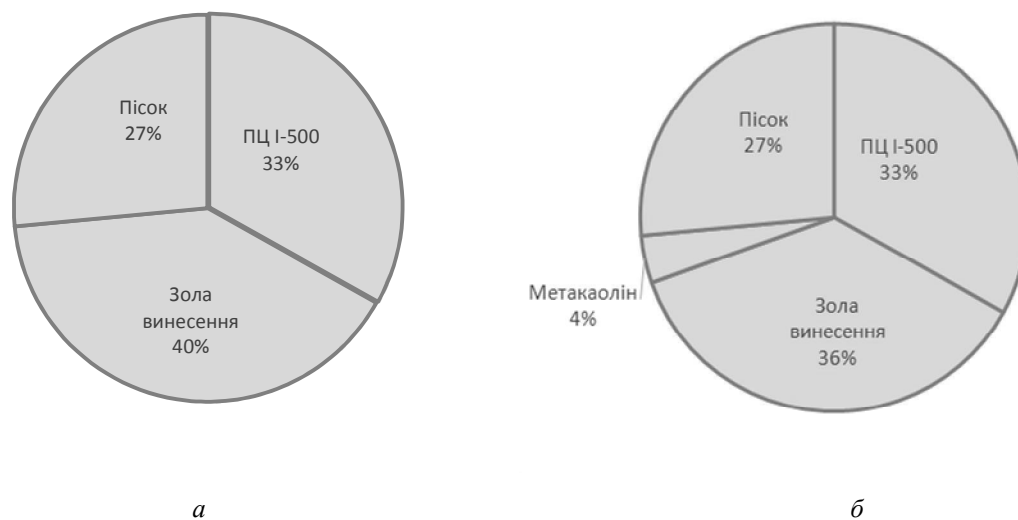


Рис. 1. Співвідношення компонентів у складах 1, 2 (а) та 3 (б)

Міцність на стиск та згин розроблених ЕСС визначали на зразках-балочках 40x40x160 мм, встановлених на двох опорах при зосередженому навантаженні, прикладеному симетрично до осі зразка. Показники пористості та водопоглинання композитів досліджували згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008. Методи та критерії механіки руйнування, в основу яких покладено в’язкість та енергію руйнування, дають змогу здійснити якісне і кількісне оцінювання ефективності дисперсного армування, а також введення ультрадисперсних мінеральних добавок [12]. Схему випробувань ЕСС на згин для визначення умовного коефіцієнта інтенсивності напружень згідно з ДСТУ Б В.2.7-227:2009 зображено на рис. 2.

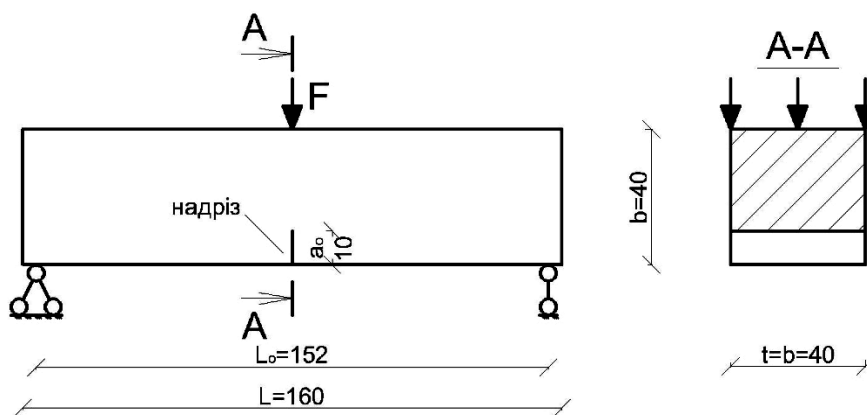


Рис. 2. Зразок-призма квадратного поперечного перерізу для випробувань на згин силою  $F$  у середині прольоту

Згідно з цим стандартом в'язкість руйнування при статичному навантаженні виражається через умовний критичний коефіцієнт інтенсивності напружень  $K_{c}^*$ , що за незрівноважених випробувань визначається за формулою:

$$K_{c}^* = \frac{3 \cdot F_c^* \cdot L_0}{2 \cdot b^{1/2} \cdot t} (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4), \quad (1)$$

де  $F_c^*$  – навантаження, що відповідає динамічному початку руху магістральної тріщини при незрівноважених випробуваннях, МН;  $\lambda$  – відносна довжина початкового надрізу, м.

$$\lambda = (a_0 + a_{0t})/b. \quad (2)$$

**Результати досліджень.** Як видно з рис. 3, введенням дисперсних волокон можна збільшити міцність на згин ЕСС у 2,8 та 1,4 разу через 7 і 28 діб відповідно порівняно з складом 1. Заміна 10 % золи винесення на метакаолін призводить до приросту міцності на згин через 7 діб на 20 % порівняно зі складом 2 і становить 6,5 МПа, через 28 діб – на 23 % із досягненням показника міцності 11,1 МПа.

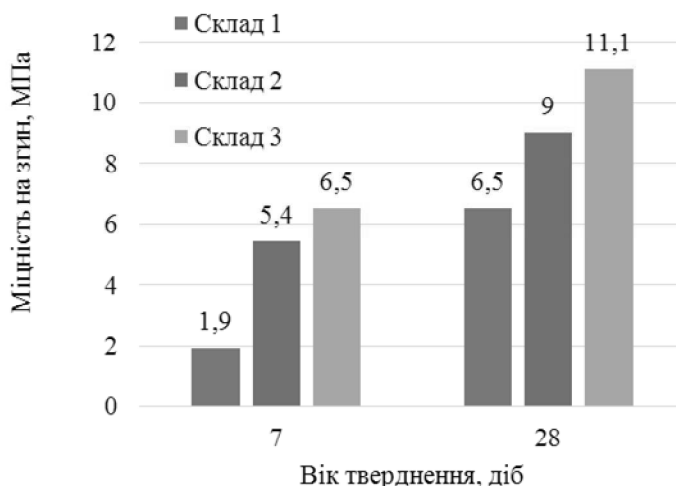


Рис. 3. Міцність на згин ЕСС

Міцність на стиск інженерних цементуючих композитів без дисперсного армування становить 37,2 МПа та 65,8 МПа через 7 і 28 діб відповідно. При введенні поліпропіленової фібри міцність зростає на 34,4 % і 10,8 % через 7 та 28 діб відповідно. Часткова заміна золи винесення добавкою метакаоліну (склад 3) зумовлює зростання міцності на стиск ЕСС через 7 діб до 56,4 МПа, через 28 діб – до 87,6 МПа (рис. 4).

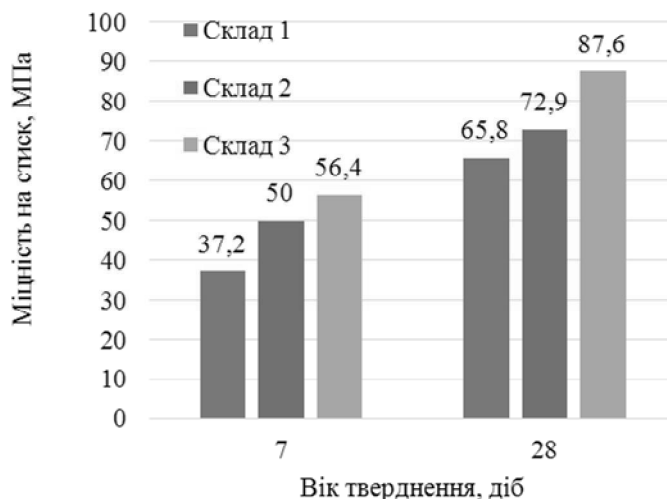


Рис. 4. Міцність на стиск ECC

Показники міцності будівельних композитів безпосередньо пов'язані з їх структурою, що визначається характером пористості. Результати випробування міцності добре корелюють із результатами визначення параметрів порової структури контрольного та модифікованого композитів. За часткової заміни золи винесення на метакполін відкрита пористість цементуючих композитів через 28 діб знижується на 35 % (рис. 5, а). Диференційний показник пористості ECC, що характеризується умовним коефіцієнтом розміру пор, при введенні метакполіну (склад 3) знижується у 3,4 разу порівняно з композитом складу 1 (рис. 5, б).

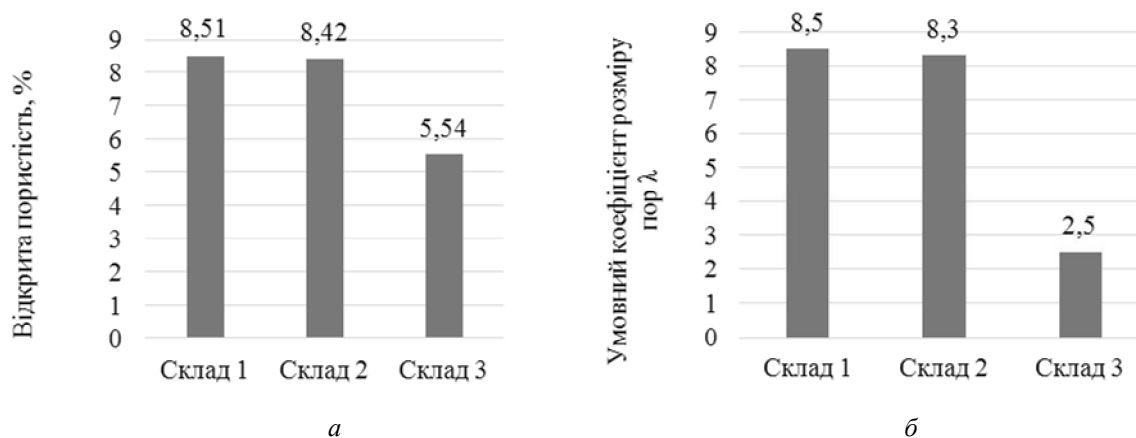


Рис. 5. Відкрита пористість (а), умовний коефіцієнт розміру пор (б) ECC

Для вивчення закономірностей поширення тріщин у розроблених ECC при навантаженні визначили в'язкість руйнування за величиною коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{с*}$ . Результати, наведені на рис. 6, свідчать, що параметри мікротріщиноутворення залежать від мезо- та мікроструктури. Дисперсне армування поліпропіленовою фіброю забезпечує тривимірне зміцнення матеріалу та розподілення напружень. ECC складу 2 характеризується зростанням значення  $K_{с*}$  через 28 діб на 39 % порівняно з ECC складу 1. Коефіцієнт інтенсивності напружень значною мірою визначається пористістю матеріалу. Пори як дефекти структури із нульовим модулем пружності є концентраторами напружень при зовнішніх навантаженнях. Так, коефіцієнт інтенсивності напружень ECC складу 3 через 7 діб у 3,4 і 1,2 разу вищий, ніж у складах 1 та 2 відповідно. Для оцінювання ефективності регулювання компонентного впливу розраховано також умовний коефіцієнт тріщиностійкості інженерних цементуючих композитів як відношення міцності

на згин до міцності на стиск. Через 28 діб коефіцієнт тріщиностійкості для складу 3 зростає на 29 % порівняно зі складом 1, що свідчить про підвищену стійкість одержаних цементуючих композицій до тріщиноутворення.

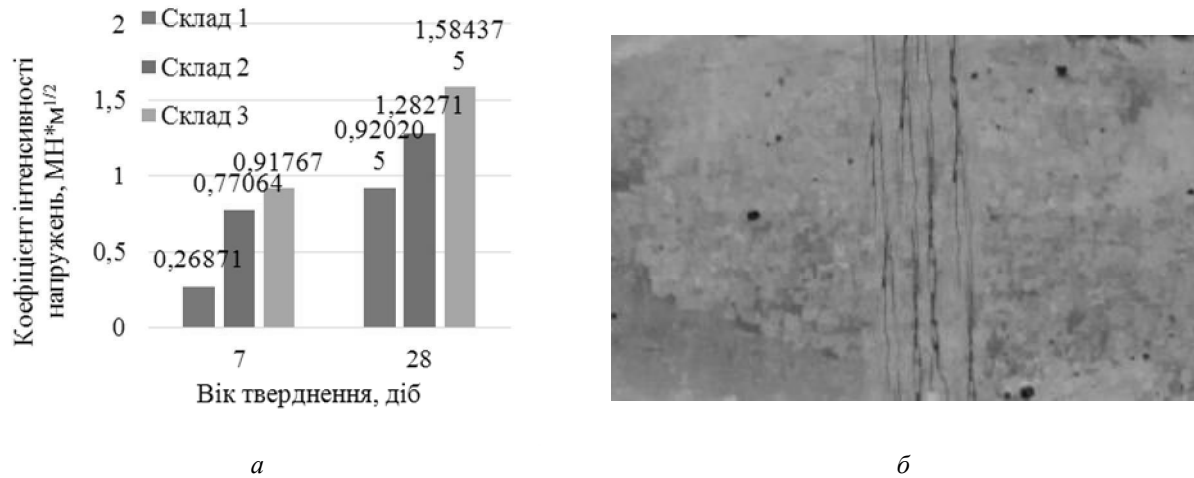


Рис. 6. Коефіцієнт інтенсивності напружень (а), умовний коефіцієнт тріщиностійкості (б) ЕСС

Слід зазначити, що завдяки дисперсному армуванню поліпропіленою фіброю та формування малодефектної структури при введенні ультрадисперсного метаксаоліну досягають ефекту множинного тріщиноутворення (multiplate cracking) (рис. 6, б) у цементуючих композитах, що забезпечує квазіпластичне руйнування матеріалу.

**Висновки.** Застосування метаксаоліну, що характеризується підвищеною активністю, для часткової заміни золи виносення сумісно з полікарбоксилатним суперпластифікатором у складі інженерних цементуючих композитів сприяє зростанню їх міцності на стиск завдяки початковому ущільненню системи, а також формуванню додаткових гідратних фаз у неклінкерній частині в'язучого. Швидке утворення волокнистих гідратних фаз зумовлює додаткове зростання міцності на згин ЕСС на 20 % порівняно з армованим композитом без метаксаоліну. Введення ультрадисперсної мінеральної добавки сприяє формуванню малопористого поверхневого шару цементуючого композиту, при цьому його відкрита пористість через 28 діб зменшується на 35 %, а показник середнього розміру пор – у 3,4 разу. Завдяки формуванню щільної малодефектної структури в присутності метаксаоліну, а також дисперсному армуванню поліпропіленою фіброю коефіцієнт інтенсивності напружень ЕСС через 28 діб зростає удвічі порівняно з неармованим композитом та у 1,4 разу – порівняно з ЕСС без метаксаоліну.

1. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / [Дворкін Л. Є., Бабич Є. М., Житковський В. В. та ін.]. – Рівне: НУВГП, 2017. – 331 с. 2. Суханов В. Г. Структура матеріала в структурі конструкції / В. Г. Суханов, В. Н. Выровой, О. А. Коробко. – Одеса: Полиграф, 2016. – 244 с. 3. 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. 4. 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. 5. 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. 6. 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. 7. Research of nanomodified engineered cementitious composites / [U. Marushchak, M. Sanytsky, N. Sydor, S. Braichenko] // IEEE 8<sup>th</sup> International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties. – 2018. – Part 2. – 02CBM16. 8. 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. 9. Дослідження тріщиностійкості важких бетонів та пінобетонів, армованих поліпропіленою фіброю для дорожнього будівництва / [Солодкий С. Й., Каганов В. О., Горніковська І. Б., Турба Ю. В.] // *Східно-Європейський журнал передових технологій*. – 2015. – № 4/5 (76). – С. 40–46. 10. Research of nanomodified Portland cement compositions with high early age strength / [Marushchak U., Sanytsky M., Mazurak T., Olevych Y.] // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – No. 6/6 (84). – P. 50–57. 11. Високоміцні самоущільнювальні бетони на основі дисперсно-армованих цементуючих систем / М. А. Саницький, У. Д. Марущак, І. І. Кіракевич, М. С. Стечишин // *Будівельні матеріали і виробництво*, 2015. – № 1. – С. 10–14 / С. Й. Солодкий, Ю. В. Турба // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. – 2017. – № 66. – С. 99–105. 13. Сидор Н. Вплив компонентного складу на властивості інженерних цементуючих композитів / Н. Сидор, У. Марущак, І. Маргаль // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. Серія: теорія і практика будівництва*. – 2018. – № 888. – С. 127–132.

### 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. Suhanov V. G., Vyrovoy V. N., Korobko O. A. (2016) *Struktura materiala v structure konstruksui*. [Structure of material in construction structure]. Odessa, Poligraf, 244 p. [in Russian]. 3. 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. 4. 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. 5. 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. 6. 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. 7. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N., Braichenko S. (2018) Research of nanomodified engineered cementitious composites. *IEEE 8th International Conference on Nanomaterials: Applications & Properties. Part 2, 02CBM16*. 8. Sakulich A. R., Li V. C. (2011) Nanoscale characterization of engineered cementitious composites (ECC). *Cement and Concrete Research*. no 41, pp. 169–175. 9. Solodkyy S. Y., Kahanov V. O., Hornikovska I. B., Turba Yu. V. (2015) *Doslidzhennia trishchynostiystkosti 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]. 10. 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. 11. Sanytsky M., Marushchak U., Kirakevych I., Stechyshyn M. (2015) *Vysokomitsni samoushchilniuvalni betony na osnovi dyspersno-armovanykh cementuuchykh system*. [High-strength self-compacting concrete based on dispersion-reinforced cementing systems]. *Budivelni materialy ta vyrobnyctvo*. No. 1. pp. 10–14. [in Ukrainian]. 12. Solodkyy S. Y., Turba Yu. V. (2017) *Pidvyshchennya trishchynostiystkosti dyspersno armovanykh polipropilenovoyu fibroyu betoniv tehnologichnymy chynnykamy*. [The improvement of crack resistance of concrete dispersive reinforced with polypropylene fiber by technological factors]. *Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arhitektury*. No. 66. pp. 99–105. [in Ukrainian]. 13. Sydor N., Marushchak U., Margal I. (2018) *Vplyv komponentnogo skladu na vlastyvosti inzhenernykh cementuyuchykh kompozytiv*. [Effect of component composition on properties of engineered cementitious composites]. *Visnyk Natsionalnoho universytetu “Lvivska politekhnika”*. Seriya: teoriia i praktyka budivnytstva. №888. pp. 127–132. [in Ukrainian].