



Троян В. В.



Кіндрась Б. П.

Троян В. В., доктор технічних наук, професор кафедри технології будівельних конструкцій і виробів, Київський національний університет будівництва і архітектури, Повітрофлотський просп., 31, Київ, Україна, 03680, ✉ s_troy@ukr.net ☎ +38 (067) 88 22 861.

Кіндрась Б. П., головний технолог, АТ «Дарницький завод залізобетонних конструкцій», вул. Бориспільська, 11, м. Київ, 02093, ✉ bogdan.kindras@gmail.com ☎ +380 (097) 10 30 007.

Vyacheslav Troyan, Doctor of Technical Sciences, Professor of Department of technologies of building structures and products, Kyiv National University of Building and Architecture, Povitroflotsky ave., 31, Kyiv, Ukraine, 03680, ✉ s_troy@ukr.net ☎ +38 (067) 88 22 861.

Bogdan Kindras, Chief technologist, JSC "Darnytskyi Plant of Reinforced Concrete Structures", Boryspilska st., 11, Kyiv, 02093, ✉ bogdan.kindras@gmail.com ☎ +380 (097) 10 30 007.

МОДЕЛЮВАННЯ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ ВИСОКОМІЦНИХ БЕТОНІВ, ЗДАТНИХ ДО САМОУЩІЛЬНЕННЯ

MODELING THE CRACK-RESISTANCE OF HIGH-STRENGTH SELF-COMPACTING CONCRETE

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ВЫСОКОПРОЧНЫХ САМОУПЛОТНЯЮЩИХСЯ БЕТОНІВ

Анотація. Наведено результати моделювання тріщиностійкості високоміцних бетонів, здатних до самоущільнення. Шляхом моделювання пружних і мікропластичних деформацій по діаграмах деформування зразків-призм з ініційованою тріщиною встановлено параметри розкриття тріщин в досліджуваних бетонах. За моделлю встановлено, що ширина розкриття усадочних тріщин у досліджуваних бетонах (на 120 добу) значно перевищує цей показник для початку утворення магістральної тріщини. Отже, за умови обмеженої усадки, утворення тріщин в досліджуваних бетонах неминуче. За моделлю, утворення мікротріщин внаслідок обмеженої усадки бетону без добавок починається на 9 добу, а утворення магістральної тріщини – на 11 добу тверднення. Початок утворення усадочних мікротріщин в бетоні з золою винос, вапняковим борошном та мікрокремнеземом починається на 6 добу тверднення. Утворення усадочних магістральних тріщин в цих бетонах починається на 8, 10 та 11 добу тверднення відповідно. Початок утворення усадочних мікротріщин в бетоні з метаксаоліном починається на 8 добу, а магістральної тріщини – на 17 добу тверднення. Отже, склад бетону з метаксаоліном можна визнати найбільш тріщиностійким серед досліджуваних, що пояснюється меншою усадкою, відносно низьким модулем пружності та відносно великою ділянкою мікропластичних деформацій бетону цього складу.

Ключові слова: високоміцний бетон, бетон здатний до самоущільнення, моделювання, тріщиностійкість, усадка, модуль пружності.

Abstract. The results of modeling the crack resistance of high-strength self-compacting concretes are presented. By modeling elastic and microplastic deformations from the deformation diagrams of prism specimens with an initiated crack, the parameters of crack opening in the concretes under study were established. According to the model, it was found that the width of the opening of shrinkage cracks in all investigated concretes (by 120 days) significantly exceeds this indicator for the beginning of the formation of the main crack. Thus, with limited shrinkage, the formation of cracks in the concretes is inevitable. In accordance with the model, the formation of shrinkage microcracks of concrete without additives begins on the 9th day, and the formation of the main crack – on the 11th day of hardening. The beginning of the formation of shrinkage microcracks in concrete with fly ash, limestone and microsilica begins on the 6th day of hardening. The formation of shrinkage main cracks in these concretes begins on the 8th, 10th and 11th days of hardening, respectively. The beginning of the formation of shrinkage microcracks in concrete with metakaolin begins on the 8th day, and the main crack – on the 17th day of hardening. Thus, the composition of concrete with metakaolin can be considered the most crack-resistant. This is due to less shrinkage, a relatively low modulus of elasticity and a relatively large area of microplastic deformation of concrete with metakaolin.

Key words: high-strength concrete, self-compacting concrete, modeling, crack resistance, shrinkage, modulus of elasticity.

Анотация. Приведены результаты моделирования трещиностойкости высокопрочных самоуплотняющихся бетонов. Путем моделирования упругих и микропластических деформаций по диаграммам деформирования образцов-призм с инициированной трещиной установлены параметры раскрытия трещин в исследуемых бетонах. По модели установлено, что ширина раскрытия усадочных трещин в исследуемых бетонах (на 120 суток) значительно превышает этот показатель для начала образования магістральной трещины. Таким образом, при ограниченной усадке, образования трещин в исследуемых бетонах неизбежно. В соответствии с моделью, образование микротрещин в результате ограниченной усадки бетона без добавок начинается на 9 сутки, а образование магістральной трещины – на 11 сутки твердения. Начало образования усадочных микротрещин в бетоне с золой уноса, известняковой мукой и микрокремнеземом начинается на 6 сутки твердения. Образование усадочных магістральных трещин в этих бетонах начинается на 8, 10 и 11 сутки твердения соответственно. Начало образования усадочных микротрещин в бетоне с метаксаолином начинается на 8 сутки, а магістральной трещины – на 17 суток твердения. Таким образом, состав бетона с метаксаолином можно признать наиболее трещиностойким среди испытываемых, что объясняется меньшей усадкой, относительно низким модулем упругости и относительно большим участком микропластической деформаций бетона этого состава.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, самоуплотняющийся бетон, моделирование, трещиностойкость, усадка, модуль упругости.

Вступ

Використання високоміцних бетонів здатних до самоущільнення, дозволяє зменшувати перетин бетонних конструкцій, при забезпеченні проектної несучої здатності. Однак, конструкції з таких бетонів потребують забезпечення тріщиностійкості. Проблема тріщиностійкості актуальна як для бетонів здатних до самоущільнення, що характеризуються підвищеними усадочними деформаціями, так і для високоміцних бетонів, що мають крихке руйнування. Підвищення тріщиностійкості таких бетонів досягається на рівні заповнювачів, в'язучих речовин, мінеральних та хімічних добавок. При цьому, результати дослідження тріщиностійко-

сті потребують комплексної оцінки, що можливо здійснювати шляхом моделювання, наприклад методом кінцевих елементів.

Таким чином, враховуючи поширення використання високоміцних бетонів здатних до самоущільнення, що характеризуються підвищеними усадочними деформаціями та крихким руйнуванням, актуальним є дослідження та комплексна оцінка їх тріщиностійкості шляхом моделювання методом кінцевих елементів.

Отже метою даної роботи було дослідження та моделювання тріщиностійкості високоміцних бетонів з бетонних сумішей здатних до самоущільнення за комплексом критеріїв (усадочні деформації, початковий модуль пружності, параметри руйнування тощо).

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Бетони здатні до самоущільнення були розроблені в Японії з метою відмови від вібрації при ущільненні, що дозволило зменшити витрати на бетонування [1]. Одним з критичних недоліків таких бетонів є підвищена усадка, що значно знижує їх тріщиностійкість [2, 3]. У випадку бетонів здатних до самоущільнення спостерігається збільшення всіх складових усадочних деформацій: аутогенної усадки внаслідок хімічних реакцій між цементом і водою, усадки внаслідок випаровування води з пор бетону та пластичної усадки [4, 5]. За даними досліджень [6], усадка бетонів здатних до самоущільнення може в 1,5 рази перевищувати усадку звичайного бетону. При обмеженій усадці, коли розтягувальні напруження бетону досягають граничного значення починається утворення тріщин [7]. При цьому, утворення усадочних тріщин в бетонах здатних до самоущільнення починається на ранніх термінах тверднення (8–13 діб) [8, 9]. Для зменшення усадки таких бетонів рекомендується забезпечувати догляд за бетоном [1], використовувати розширювальні і протисусадочні добавки [10, 11] та армуючі волокна [12, 13]. Підвищений вміст в бетонах здатних до самоущільнення цементу та наповнювачів призводить до збільшення аутогенної усадки бетону та усадки внаслідок випаровування води [4, 14]. На значення усадки впливають фактори пов'язані з капілярним тиском води в порах бетону [15]. Так, усадка бетону здатного до самоущільнення може зменшуватись при використанні мікрокремнезему [16], золи виносу, вапняку [17] та метаксаоліну [18] при їх використанні на заміну цементу. Крім усадки на тріщиностійкість бетону впливають модуль пружності, повзучість, міцність на розтяг тощо [19]. Отже, всі ці параметри слід враховувати при комплексній оцінці тріщиностійкості [20]. Спробу такої оцінки тріщиностійкості бетону здатного до самоущільнення з вапняком і мікрокремнеземом наведено в роботі [2]. Доцільним є проведення комплексної оцінки тріщиностійкості високоміцного бетону здатного до самоущільнення з добавками золи виносу та метаксаоліну, що можуть здійснювати позитивний вплив на деформативність бетонів [18].

Отже, за результатами огляду літератури можна відзначити можливість підвищення та комплексної оцінки тріщиностійкості високоміцних бетонів з бетонних сумішей здатних до самоущільнення шляхом модифікації бетонів та моделювання за результатами досліджень усадки, модуля пружності та параметрів, що характеризують тріщиноутворення.

Матеріали та методи досліджень

В дослідженнях використано портландцемент СЕМ І 42,5 R (ПАТ «Подільський Цемент», CRH, Україна). Мінеральні добавки: метаксаолін METAVER І (NEWCHEM AG, Австрія), мікрокремнезем Microsilica 940 (Elkem, Норвегія), вапнякове борошно (Державне підприємство Закупнянський кар'єр, Україна). Заповнювачі: пісок річковий кварцовий, щебінь гранітний фракції 5–10 та 10–20 мм. Добавки суперпластифікатори виробництва «МС-Vauchemie», Німеччина.

Фізико-механічні дослідження здійснювали у відповідності з діючими нормативними документами. Модуль пружності бетону визначали відповідно ДСТУ Б В.2.7-217:2009. Параметри тріщиностійкості бетонів при статичному навантаженні визначали на зразках-призмах з ініційованою тріщиною за ДСТУ Б В.2.7-227:2009.

Моделювання параметрів тріщиноутворення бетонів здійснювали методом кінцевих елементів в професійному програмному комплексі ELCUT.

Моделювання тріщиностійкості високоміцних бетонів здатних до самоущільнення

Як відзначалося вище, основною причиною утворення тріщин в бетоні, здатному до самоущільнення, є усадочні деформації. За результатами попередніх досліджень було встановлено, що введення на заміну цементу 10 % золи виносу, мікрокремнезему та вапнякового борошна дозволило знизити усадку бетону на 120 добу до 0,34–0,36 мм/м. Введення 10 % метаксаоліну знизило усадку до 0,29 мм/м. Усадка складу бетону без добавок на 120 добу становила 0,38 мм/м. На 7 добу тверднення склад бетону без добавок мав меншу усадку (0,06 мм/м) ніж склади з мінеральними добавками (0,11–0,14 мм/м).

Напруження бетону, що виникають внаслідок деформацій усадки, прямо пропорційні його модулю пружності. За результатами досліджень високоміцних бетонів найменшим початковим модулем пружності при згині 36,6 ГПа характеризувався склад бетону з 10 % метаксаоліну, найбільшим 50,4 ГПа – склад бетону з 10 % мікрокремнезему. Початкові модулі пружності при згині 41–42 ГПа показали бетони без добавок, з 10 % золи виносу та вапнякового борошна.

В якості показника крихкості руйнування високоміцних бетонів розглядали (рис.1) розмір ділянки мікропластичних деформацій (1–2), що відповідає різниці деформацій початку мікротріщиноутворення (1) та початку утворення магістральної тріщини (2).

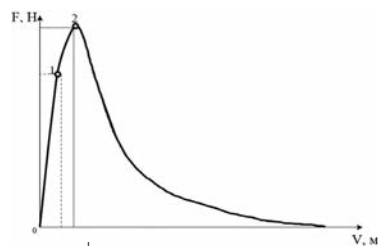


Рис. 1. Діаграма деформування при згині бетонної призми з ініційованою тріщиною

Найбільш крихким руйнуванням, за цим критерієм, характеризувалися зразки високоміцного бетону базового складу (ділянка 1–2 ~ 7 мкм), при величині ділянки пружного деформування (0-1) матеріалу ~ 30 мкм. Найменш крихким руйнуванням характеризувалися зразки бетону з золою виносу (ділянка 1–2 ~ 13,5 мкм) та метаксаоліном (ділянка 1–2 ~ 12,5 мкм). Величина ділянки пружного деформування (0-1) зразків бетону з золою виносу та метаксаоліном становила ~ 26,5 мкм. Середніми показниками крихкості руйнування характеризувалися зразки бетону з мікрокремнеземом (ділянка 1–2 ~ 10 мкм) і вапняковим борошном (ділянка 1–2 ~ 10,5 мкм). Величина ділянки пружного деформування (0-1) зразків бетону з мікрокремнеземом становила ~ 23 мкм, а зразків бетону з вапняковим борошном ~ 25 мкм.

Параметри розкриття тріщин в досліджуваних бетонах одержували шляхом моделювання за діаграмами деформування зразків-призм з ініційованою тріщиною (рис. 2): лінійної ділянки (0-1) пружного деформування матеріалу та ділянки мікропластичних деформацій (1-2) до початку утворення магістральної тріщини (рис. 1).

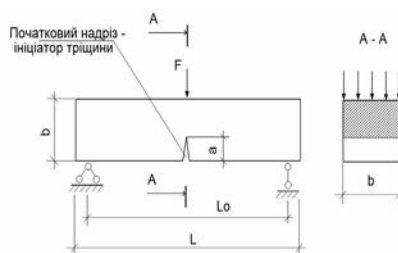


Рис. 2. Схема випробувань зразка-призми на згин з ініційованою тріщиною

За моделями була розрахована ширина розкриття тріщин (рис. 3), що відповідає початку мікротріщиноутворення та початку утворення магістральної тріщини. Як видно з рис. 3, початок утворення мікротріщин в бетоні базового складу без добавок починається при розкритті ініційованої тріщини до 17,6 мкм, при подальшому розкритті ініційованої тріщини до 21,7 мкм починається утворення магістральної тріщини. Таким чином ділянці мікропластичних деформацій відповідає розкриття тріщини ~ 4 мкм.

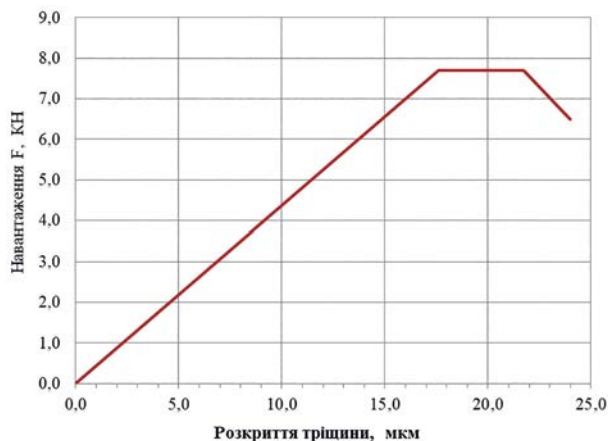


Рис. 3. Розкриття тріщини в бетоні складу без добавок за моделлю

Початок утворення мікротріщин в високоміцному бетоні з золою виносу та мікрокремнеземом починається при розкритті ініційованої тріщини 15,5 та 13,7 мкм відповідно, а при розкритті ініційованої тріщини до 23,5 та 19,8 мкм відповідно, починається утворення магістральної тріщини (рис.4). Початок утворення мікротріщин в бетоні

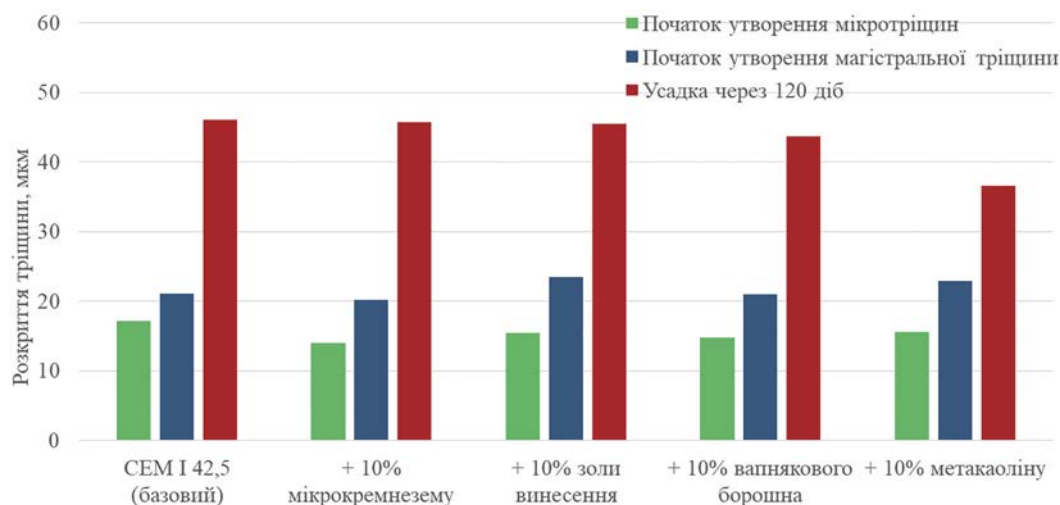


Рис. 4. Розкриття тріщин в досліджуваних бетонах за моделлю



Рис. 5. Прогнозований час початку утворення усадочних тріщин в досліджуваних бетонах

з метакооліном та вапняковим борошном починається при розкритті ініційованої тріщини 15,6 та 14,8 мкм відповідно, при розкритті тріщини до 22,9 та 21,1 мкм відповідно, починається утворення магістральної тріщини. Одержані за моделлю параметри розкриття тріщин були використані для прогнозування розкриття усадочних тріщин в досліджуваних бетонах (рис. 4).

Як видно з рис.4, значення розкриття тріщин внаслідок обмеженої усадки досліджуваних бетонів (за моделлю на 120 добу) в 1,5-2 рази перевищують значення розкриття тріщин початку утворення магістральної тріщини. Таким чином, за умови обмеження усадочних деформацій, утворення усадочних тріщин в досліджуваних високоміцних бетонах здатних до самоущільнення є неминучим.

Як видно з рис. 5, мікротріщиноутворення внаслідок обмеженої усадки (за моделлю) бетону без добавок починається на 9 добу, а утворення магістральної тріщини – на 11 добу тверднення. Початок утворення усадочних мікротріщин (за моделлю) в високоміцному бетоні з золою виносу, вапняковим борошном та мікрокремнеземом починається на 6 добу тверднення, а на 8, 10 та 11 добу тверднення відповідно, починається утворення усадочних магістральних тріщин (рис. 5). Початок утворення усадочних мікротріщин в бетоні з метакооліном починається на 8 добу, а утворення магістральних тріщин починається лише на 17 добу тверднення (рис. 5).

Отже, за результатами моделювання склад високоміцного бетону, здатного до самоущільнення з метакооліном можна визнати найбільш тріщиностійким серед досліджуваних. Це пояснюється найменшою усадкою, відносно низьким модулем пружності та відносно великою ділянкою мікропластичних деформацій бетону цього складу. Зменшення усадочних деформацій бетону при використанні метакооліну пояснюється збільшенням кількості новоутвореного етtringіту внаслідок реакції Al_2O_3 метакооліну з $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ цементу [18].

Висновки

1. Шляхом моделювання за діаграмами деформування зразків-призм з ініційованою тріщиною ділянок пружних та мікропластичних деформацій встановлено параметри розкриття тріщин в досліджуваних бетонах. За моделлю встановлено, що розкриття усадочних тріщин досліджуваних бетонів (на 120 добу) значно перевищує показник початку утворення магістральної тріщини. Отже, за умови обмеження усадочних деформацій, утворення тріщин в досліджуваних бетонах неминуче.

2. За моделлю, утворення мікротріщин внаслідок обмеженої усадки високоміцного бетону без добавок починається на 9 добу, а утворення магістральної тріщини – на 11 добу тверднення. Початок утворення усадочних мікротріщин в високоміцному бетоні з золою виносу, вапняковим борошном та мікрокремнеземом по-

чинається на 6 добу тверднення. Утворення усадочних магістральних тріщин в цих бетонах починається на 8, 11 та 10 добу тверднення відповідно. Початок утворення усадочних мікротріщин в бетоні з метакаоліном починається на 8 добу, а магістральної тріщини – на 17 добу тверднення. Отже, склад бетону з метакаоліном можна визнати найбільш тріщиностійким серед досліджуваних.

3. Підвищена тріщиностійкість високоміцного бетону здатного до самоущільнення з добавкою метакаоліну пояснюється зменшеною усадкою, відносно низьким модулем пружності та відносно великою ділянкою мікропластичних деформацій. Зменшення усадочних деформацій бетону при використанні метакаоліну пояснюється збільшенням кількості новоутвореного етtringіту внаслідок реакції Al_2O_3 метакаоліну з $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ цементу.

Література:

1. Lino Maia, Influence of Shrinkage Reducing admixtures on distinct SCC mix compositions // Lino Maia, Helena Figueiras, Sandra Nunes, Miguel Azenha, Joaquim Figueiras [Text] // Construction and Building Materials, 35 (2012), pp. 304–312.
2. Philippe Turcry, Cracking Tendency of Self-Compacting Concrete Subjected to Restrained Shrinkage: Experimental Study and Modeling [Text] / Philippe Turcry, Ahmed Loukili, Khalil Haidar, Gilles Pijaudier-Cabot, and Abdeldjelil Belarbi // Mater. Civ. Eng., 2006, 18:46–54.
3. Rozière E, Influence of paste volume on shrinkage cracking and fracture properties of self-compacting concrete [Text] / Rozière E., Granger S., Turcry P., Loukili A. // Cem. Concr. Compos., 2007, 29(8), pp. 626–636.
4. Amjad Alrifai, Paste and mortar studies on the influence of mix design parameters on autogenous shrinkage of self-compacting concrete [Text] / Amjad Alrifai, Salima Aggoun, Abdelkader Kadri, Said Kenai, El-hadj Kadri // Construction and Building Materials, 47 (2013), pp. 969–976.
5. Andreas Leemann, Impact of admixtures on the plastic shrinkage cracking of self-compacting concrete [Text] / Andreas Leemann, Peter Nygaard, Pietro Lura // Cement & Concrete Composites, 46 (2014), pp. 1–7.
6. Klug Y., Comparison of the hardened properties of self-compacting and normal vibrated concrete [Text] / Klug Y., Holschemacher K. // Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 596–605.
7. Weiss J., Shrinkage reducing admixtures in early age cracking in cementitious systems. Report of RILEM Technical Committee 181-EAS. Early age shrinkage induced stresses and cracking in cementitious systems [Text] / Weiss J., Berke N. // RILEM Publications SARL, 2002.
8. Miguel José Oliveira, Curing effect in the shrinkage of a lower strength self-compacting concrete [Text] / Miguel José Oliveira, António Bettencourt Ribeiro, Fernando Garrido Branco // Construction and Building Materials, (2015).
9. Gilson Lomboy, Shrinkage and Fracture properties of Self-Consolidating Concrete [Text] / Gilson Lomboy, Kejin Wang, Chengsheng Ouyang // Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23:1514–1524.
10. Collepardi M., Effects of shrinkage-reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non wet curing conditions [Text] / Collepardi M., Borsoi A., Collepardi S., Ogoumah Olagot J.J., Troli R. // Cem. Concr. Compos., 2005, 27(6):704–8.
11. Valeria Corinaldesi, Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self-compacting concrete [Text] / Valeria Corinaldesi // Construction and Building Materials, 36 (2012), pp. 758–764.
12. F. Aslani, Creep and shrinkage of self-compacting concrete with and without fibers [Text] / F. Aslani, S. Nejadi // Journal of Advanced Concrete Technology, 2013 Volume 11, Issue 10, Pages 251–265.
13. Apoorva Chandak, Analysis of Self-Compacting Concrete Using Hybrid Fibres [Text] / Apoorva Chandak, Nitin Agrawal, Divyansh Thakur, Abhyuday Titiksh // International Journal of Trend in Research and Development, Volume 3(2), Mar – Apr 2016.
14. Farhad Aslani, Shrinkage behavior of Self Compacting Concrete [Text] / Farhad Aslani, Shami Nejadi // Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2012, 13(6):407–419.
15. G. Heirman, Influence of Mineral Additions and Chemical Admixtures on Setting and Volumetric Autogenous Shrinkage of SCC Equivalent- Mortars [Text] / G. Heirman, L. Vandewalle, D. Van Gemert, // G. De Schutter, V. Boel (Eds.), Proceedings of 5th international RILEM symposium on self-compacting concrete, RILEM Publications S.A.R.L., Ghent, 2007, pp. 553–558.
16. B. Lothenbach, Influence of limestone on the hydration of Portland cements [Text] / B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci, K. Scrivener // Cem. Concr. Res., 38 (6) (2008), pp. 848–860.
17. Valcuende Payá, MO., Influence of limestone filler and viscosity-modifying admixture on the shrinkage of self-compacting concrete [Text] / Valcuende Payá, MO.; Marco Serrano, E.; Parra, C.; Serna Ros, P. // Cement and Concrete Research, 42 (2012), pp. 583–592.
18. Дворкін, Л. Й. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах [Текст] / Л. Й. Дворкін, Н. В. Лушнікова, Р. Ф. Рунова, В. В. Троян. – К.: Вид-во КНУБА, 2007. – 216 с. ISBN 978-966-627-136-8
19. Shah S. P., A method to predict shrinkage cracking of concrete [Text] / Shah S. P., Ouyang C., Marikunte S., Yang, W., Becq-Giraudon E. // ACI Mater. J., 954, 1998, pp. 339–346.
20. Hammer T.A., Cracking susceptibility due to volume changes of self-compacting concrete [Text] / Hammer T.A. // Proc. 3rd Int. RILEM Symp. on Self-Compacting Concrete, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 553–557.