

**Міністерство освіти і науки України
Академія будівництва України
Національний університет водного господарства
та природокористування
Північно-Західне територіальне відділення АБУ**

**РЕСУРСОЕКОНОМНІ
МАТЕРІАЛИ, КОНСТРУКЦІЇ,
БУДІВЛІ ТА СПОРУДИ**

Збірник наукових праць

Випуск 38

Рівне – 2020

Зареєстрований Міністерством юстиції України (свідоцтво KB 23958-13798 Р від 21.05.2019).

Включений до переліку наукових фахових видань України (наказ МОН України № 1714 від 28.12.17 р.)

Збірник наукових праць рекомендовано до видання Вченою радою Національного університету водного господарства та природокористування (протокол № 10 від 23 грудня 2019 р.).

Наведені нові результати фундаментальних та прикладних досліджень в області будівельних матеріалів та технологій їхнього виготовлення, теорії опору елементів будівельних конструкцій зовнішнім впливам, методи їхнього розрахунку. Висвітлені окремі питання розрахунків та підсилення будівельних конструкцій, будівель і споруд.

Призначений для наукових працівників, спеціалістів проектних організацій і виробничих підприємств будівельної галузі, докторантів, аспірантів та студентів навчальних закладів будівельного напрямку.

Редакційна колегія

Бабич Є. М., д. т. н., проф. – головний редактор (Національний університет водного господарства та природокористування); **Азізов Т. Н., д. т. н., проф.** (Уманський державний педагогічний університет імені П. Тичини); **Андрійчук О. В., к. т. н., доцент** (Луцький національний технічний університет); **Бамбура А. М., д. т. н., проф.** (ДП «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій»); **Бліхарський З. Я., д. т. н., проф.** (Національний університет «Львівська політехніка»); **Дабковскі Норберт д. т. н., проф.** (Варшавський університет природничих наук, SGGW, Польща); **Дворкін Л. Й., д. т. н., проф.** (Національний університет водного господарства та природокористування); **Догойда Марек, д. т. н., проф.** (Варшавський університет природничих наук, SGGW, Польща); **Житковський В. В., к. т. н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування); **Журавський О. Д., к. т. н., доцент** (Київський національний університет будівництва та архітектури); **Клименко Є. В., д.т.н., проф.** (Одеська державна академія будівництва і архітектури); **Кочкар'єв Д. В., д. т. н., проф.** (Національний університет водного господарства та природокористування); **Орешкович Матія, к. т. н., доцент** (Університет Північ, Хорватія); **Семенюк С. Д., д. т. н., проф.** (Білорусько-російський університет, Республіка Білорусь); **Шмуклер В. С., д. т. н., проф.** (Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова); **Філіпчук С. В., к. т. н., доцент – секретар** (Національний університет водного господарства та природокористування).

Технічний секретар – Прохонюк Л.С.

Адреса редколегії: 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11, НУВГП
kaf_ingconst@ukr.net або kaf-pcbis@nuwm.edu.ua

ISSN 2218-1873,

ISBN

©Національний університет водного господарства та природокористування, 2020
© Видавництво «Волинські обереги», 2020

**ПРОФЕСОРУ ДВОРКІНУ ЛЕОНІДУ ЙОСИПОВИЧУ
80 РОКІВ**



Заслужений діяч науки і техніки України,
дійсний член Академії будівництва України,
академік Міжнародної інженерної академії,
доктор технічних наук, професор,
почесний професор Національного університету
водного господарства та природокористування і
Придніпровської державної академії
будівництва та архітектури,
завідувач кафедри технології будівельних
виробів і матеріалознавства Національного
університету водного господарства та
природокористування

ВИДАТНИЙ ВЧЕНИЙ - МАТЕРІАЛОЗНАВЕЦЬ

Дивлячись на цього коренастого, з коротким їжачком сивого волосся, високим чолом і молодими очима чоловіка, навряд чи даси йому вісімдесят. Але час неухильно веде свій відлік, і професору Леоніду Йосиповичу Дворкіну 11 січня 2020 року виповнюється вісімдесят років. Наближаючись до такого життєвого рубежу, закономірно підводиш певні підсумки. Професору Дворкіну Л.І. є що "поставити на свій баланс". Він один з провідних учених в галузі будівельного матеріалознавства і технології бетонів, відомий не лише в Україні, але і далеко за її межами. Його роботи опубліковані в багатьох країнах. Сорок три монографії з різних проблем сучасної технології в'язучих, бетонів і інших будівельних матеріалів підсумовують результати найбільш значних і оригінальних багаторічних розробок, виконаних безпосередньо Л.І. Дворкіним та під його керівництвом аспірантами і докторантами.

Професор Дворкін Л.І. завжди нерозривно пов'язаний із запитами будівельної практики. Дивує його енциклопедизм, надзвичайно широкий діапазон професійних знань. Ним підготовлені довідники та посібники, які користуються широкою популярністю серед фахівців з будівельних матеріалів і виробів, для сільського і меліоративного будівництва, сучасних опоряджувальних матеріалів, матеріалів з відходів промисловості, практичного бетонознавства.

Професор Дворкін Л.І. зробив вагомий внесок в створення нормативно-методичної літератури. Великий комплекс методик проектування складів бетону різних видів, створення матеріалів з використанням різноманітних відходів промисловості, ефективних бетонів та розчинів нового покоління, розроблених за активної участі професора Дворкіна Л.І., відображений в різних галузевих і відомчих рекомендаціях та керівництвах. Популярністю як у науковців, так і виробничників користується Всеукраїнський науково-практичний семінар з проблеми "Структура-склад-властивості бетону", керівником якого він є.

Професор Дворкін Л.І. є автором і провідним співавтором 44 монографій, 58 підручників і посібників, 11 довідників, 19 рекомендацій та настанов.

Професор Дворкін Л.І. активно займається винахідницькою роботою. В його творчому доробку більш ніж 120 авторських свідоцтв і патентів на нові матеріали і способи їх отримання. Кафедра, яку очолює професор Дворкін Л.І. – неодноразовий переможець в університеті з винахідницької роботи.

Більше 900 статей і доповідей опубліковано у різноманітних наукових журналах, збірниках наукових праць, матеріалах конференцій. Це дійсно титанічна праця, вагомий внесок у будівельну і матеріалознавчу науку. Останніми роками професором Дворкіним Л.І. опубліковано ряд

фундаментальних робіт, в яких поряд з аналізом і узагальненням наявного світового досвіду наводяться і результати, отримані його науковою школою. До таких робіт можна віднести монографії "Основи бетонознавства" (С-Петербург, 2006 і Київ, 2007), "Будівельні матеріали з відходів промисловості", вид-во "Фенікс", Ростов-на-Дону, 2007 (підготовлені спільно з професором, д.т.н. Дворкіним О.Л.), "Практичне бетонознавство в питаннях та відповідях", С. - Петербург, 2008 (підготовлено спільно з співробітниками кафедри)., " Модифіковані золівмісні сухі будівельні суміші для мурувальних і клейових розчинів" (Рівне, 2013), "Ефективні гіпсові матеріали" (Рівне, 13), "Проектування складів бетонів" (Рівне, 2015), "Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони" (Рівне, 2017), "Сухие строительные смеси с применением дисперсных отходов промышленности" (М.: Изд-во Инфра-Инженерия, 2019).

Одинадцять монографій видані в Сполучених Штатах Америки та країнах Європейського Союзу.

Випускниками наукової школи професора Дворкіна Л.Й. є 27 кандидатів і 1 доктор наук. Аспірантура кафедри "Технології будівельних виробів і матеріалознавства" продовжує успішно готувати науково-педагогічні кадри.

Професор Дворкін Л.Й. успішно поєднує наукову і педагогічну роботу. Він 52 роки працює в Національному університеті водного господарства та природокористування, 50 випусків інженерів-будівельників і гідротехніків серед своїх педагогів можуть назвати і професора Дворкіна Л.Й. В 1985 році він організував в НУВГП кафедру "Технологія будівельних виробів і матеріалознавства", незмінним керівником якої він є до цього часу. З 1990 році на кафедрі готують фахівців за спеціалізацією "Технологія виробництва будівельних конструкцій, виробів і матеріалів". Студенти НУВГП за даною спеціальністю займають традиційно призові місця на Всеукраїнських олімпіадах і працюють провідними спеціалістами в проектних і виробничих організаціях.

Високий професіоналізм, досконале володіння навчальним матеріалом, вимогливе, але одночасно, і доброзичливе відношення до студентів - такий стиль педагогічної роботи професора Дворкіна Л.Й. Він постійно працює над вдосконаленням навчальних дисциплін, що викладає, і створенням оригінальної навчально-методичної літератури. Великий комплекс підручників та навчальних посібників, що він підготував за 52 роки – це дійсно унікальний результат його науково-педагогічної діяльності!

Професор Дворкін Л.Й. був співавтором перших підручників "Будівельне матеріалознавство", що включають поряд з будівельно-технологічною характеристикою матеріалів і теоретичний розділ, який зв'язує властивості матеріалів з особливостями їх структуроутворення. Курс "Будівельне матеріалознавство" змінив традиційний для будівельних вищих навчальних закладів курс "Будівельні матеріали". Професор Дворкін Л.Й. розробив ряд

спеціальних курсів і підготував відповідні посібники для студентів різних будівельних спеціальностей. Ним вперше складені підручники по будівельних матеріалах спеціально для гідротехніків, сільських будівельників, навчальні посібники по будівельних матеріалах з промислових відходів. Професори Дворкін Л.Й. і Дворкін О.Л. підготували один з перших підручників "Бетони і будівельні розчини", Київ, 2008 р.

Професор Дворкін Л.Й. – Заслужений діяч науки і техніки України, дійсний член Академії будівництва України, лауреат премії ім. акад. М.С. Буднікова, академік Міжнародної інженерної академії, член Нью-Йоркської академії наук. Він академік Академії технологічних наук України. Почесний професор НУВГП та Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. Дворкін Л.Й. продовжує активно працювати і сповнений творчих задумів.

**Голова правління
Північно-Західного територіального відділення
Академії будівництва України,
академік Академії будівництва України,
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри інженерних конструкцій
Національного університету водного господарства
та природокористування
Бабич Є.М.**

Кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУВГП 35 років

Кафедра ТБВіМ була створена як структурна одиниця (кафедра будівельних матеріалів) у складі НУВГП у 1985 р. Вона була виділена зі складу кафедри технології будівельного виробництва та будівельних матеріалів, що діяла в університеті з 1973 р. Керівником кафедри був обраний доктор технічних наук, професор Л.Й. Дворкін. У 1990 р. на кафедрі була розпочата підготовка інженерів будівельників-технологів за спеціальністю технологія будівельних виробів і конструкцій. Кафедра стала випусковою і була перейменована в кафедру технології будівельних виробів і матеріалознавства. Потреба в спеціалістах будівельниках-технологах була обумовлена розвиненою базою будівельної індустрії в регіоні.

За роки існування кафедри було підготовлено 24 випусків спеціалістів-технологів у кількості 641 випусників. З 2016 року кафедра перейшла на підготовку бакалаврів та магістрів за відповідною спеціалізацією спеціальності "цивільне будівництво та інженерія".

Кафедра включає 5 навчальних лабораторій, методичний кабінет і атестовану науково-дослідну лабораторію.

На даний час на кафедрі на викладацьких посадах 1 доктор наук, 4 кандидата технічних наук і 4 одиниці допоміжного персоналу. У розвиток кафедри внесли значний внесок викладачі, які в різні роки, працювали на ній: професор Дворкін О.Л., доценти Шестаков В.Л., Скрипник І.Г., Гарніцький Ю.В., старший викладач Тимофеева Л.В., інженер Зінченко С.В.

Навчально-виховна та методична робота кафедри направлена на здійснення та науково-методичне забезпечення навчального процесу, а також виховну роботу серед студентської молоді.

При проведенні навчальних занять на кафедрі широко практикуються активні методи навчання, що включають широке використання різноманітних наочних матеріалів, розв'язування проблемних ситуацій, виконання лабораторних робіт науково-дослідницького характеру, рішення задач прикладного характеру, що можуть виникати в майбутній практичній роботі випускників. В даний час практично за рахунок, переважно власних розробок, кафедра забезпечила необхідними підручниками, посібниками, методичними рекомендаціями весь комплекс дисциплін, що викладаються (25 навчальних дисциплін).

За роки існування кафедри підготовлено 58 підручників і навчальних посібників. Підручники підготовлені з таких базових дисциплін як "Будівельне матеріалознавство", "Бетони і будівельні розчини", "Будівельні в'язучі матеріали". Вперше підготовлені навчальні посібники з комп'ютерного бетонознавства, проектування складів бетонів в т.ч. з застосуванням методів математичного планування експериментів та ін.

Розроблений лабораторний практикум, включаючий роботи дослідницького характеру і комплекс практичних робіт, що включає розв'язування проблемних ситуацій. З курсу "Будівельне матеріалознавство" розроблений комплекс задач, який виданий окремим посібником.

Всі дипломні проекти, а зараз магістерські роботи, що захищаються на кафедрі, мають обов'язково науковий розділ і в більшості виконуються за замовленням підприємств.

Кафедра ТБВіМ малочисельна. Зараз на ній працює, крім завідувача, 4 викладача кандидата наук, що закінчили аспірантуру при кафедрі. Незважаючи на малочисельність кафедра ТБВіМ займає передові позиції серед інших кафедр інституту будівництва та архітектури і університету в цілому. Вона неодноразово виходила переможцем з різних конкурсів, що стосуються наукової і методичної роботи, Всеукраїнських олімпіад і конкурсів студентських наукових робіт, 9 років є переможцем конкурсу "Краща наукова і методична розробка".

Найважливішою складовою діяльності кафедри ТБВіМ є **наукова робота**. Рівень наукової роботи кафедри визначає кваліфікацію викладацького складу і значною мірою якість спеціалістів, яких вона готує.

Наукова робота кафедри здійснюється за наступними напрямками:

1. Проектування оптимальних складів бетонів різних видів. Розробка систем проектування і управління складами бетонних сумішей.
2. Ресурсозбереження в технології в'язучих і бетонів. Застосування промислових відходів у виробництві будівельних матеріалів.
3. Розробка ефективних технологій в'язучих, бетонів та інших будівельних матеріалів. Бетони і будівельні розчини нового покоління.
4. Вивчення основних закономірностей структуроутворення і синтезу основних властивостей в'язучих і бетонів.

За першим напрямком розроблена теорія і методологія багатопараметричного проектування складів бетонів різних видів з застосуванням структурно-фізичних закономірностей і математичного моделювання. Ця методологія отримала широке визнання як в Україні, так і поза її межами. Основні розробки з цього напрямку широко опубліковані в різних країнах світу в т.ч. в Сполучених штатах Америки, країнах Європейського Союзу і використанні при проектуванні складів бетону для багатьох будівельних об'єктів в т.ч. атомних електростанцій, крупних гідротехнічних споруд, об'єктів дорожнього будівництва та ін. Розроблені системи комп'ютерного забезпечення методик проектування складів основних видів бетону, адаптації та коректування складами які використовуються на підприємствах будівельної індустрії.

Протягом 1985-2019 рр. з проблеми методології проектування складів бетону опубліковано 19 монографій та навчальних посібників основаних на виконаних дослідженнях, 8 брошур з рекомендаціями.

Методологія, що розроблена на кафедрі використана при розробці національного стандарту ДСТУ-НБВ 2.7-299:2013 "Настанова щодо визначення складу важкого бетону". В 2013 р. одним з найбільш рейтингових видавництв наукової літератури Nova Science Publishers (Нью-Йорк) видана монографія "Mult-Parametric Concrete Compositions Design" (Багатопараметричне проектування складів бетону) де узагальнені основні положення розробленої методології.

Кафедра системно розробляє проблему ресурсозбереження в технології в'язучих та бетонів, а також інших будівельних матеріалів і перш за все за рахунок використання промислових відходів.

Найбільш значні наукові дослідження в цьому напрямку використані в плані розробки ефективних технологій використання золошлакових відходів, фосфогіпсу, відходів каменеподрібнення.

Ще в 1980 р. професорами Л.Й. Дворкіним та І.А. Пашковим був виданий перший в Україні навчальний посібник для вищих навчальних закладів "Будівельні матеріали з промислових відходів".

З 1985 по 2019 рр. видані такі монографії як "Ресурсозбереження в будівництві за рахунок застосування побічних промислових продуктів (1986 р.), "Відходи хімічної промисловості у виробництві будівельних матеріалів (1986 р.)", "Будівельні матеріали з відходів промисловості(1989 та 2007 рр.)", "Принципово нові прийоми і методи застосування техногенних продуктів"(1990)", "Енергоресурсозберігаючі мінеральні в'язучі речовини та композиційні будівельні матеріали на їх основі(2014 р.)" та ін.

У 2015 р. в Німеччині опублікована монографія "Ефективні цементно-зольні бетони", у 2016 р. в Сполучених штатах Америки у видавництві "Nova Science Publishers" монографія "Будівельні матеріали на основі промислових відходів", (Construction Materials Based on Industrial Wastes Products). В Нідерландах видавництво "Elsevier" видало колективну монографію Sustainability of Construction Materials де нами підготовлено розділ "Стабільність гіпсових виробів на основі фосфогіпсу як будівельних матеріалів" (англ.).

У 2018 р. у Великій Британії вийшла з друку у видавництві "Teilor and Frensis group" англійською мовою монографія "Виробництво бетонів і розчинів з застосуванням кам'яних відсівів"(англ.), у Німеччині монографія "Безвипалювальні в'язучі матеріали і виробы на їх основі".

У 2020 р. англо-американським видавництвом "CRC Press" заплановано видання нашої нової монографії "Покращення властивостей золо-шлакових в'язучих і бетонів". В ній будуть відображені роботи кафедри виконані в останні роки.

Всього з проблеми ресурсозбереження і застосування промислових відходів для виробництва будівельних матеріалів підготовлено за період 1985 – 2019 рр. та видано 25 монографій та навчальних посібників, де використані

результати досліджень, що виконані на кафедрі. За результатами досліджень з даної проблеми за роки існування кафедри підготовлено майже 500 наукових статей та доповідей на конференціях.

Значне місце в науковій роботі кафедри знаходить **розробка ефективних технологій в'язучих і бетонів**. В цьому плані можна відзначити роботи, що присвячені розробці технологій литих бетонів, в т.ч. литих шлакових і зольних бетонів, зола- і базальтових бетонів, сульфатно-шлакових бетонів, бетонів на петроцементних, малоцементних і малоклінкерних бетонів, модифікованих вібропресованих бетонів. В останні роки на кафедрі велика увага відводиться розробці високоміцних швидкотверднучих литих і самоущільнювальних бетонів типу High Performance Concrete, реактивних порошкових бетонів, фібробетонів для захисних споруд оборонного та цивільного призначення, а також сухих будівельних сумішей різного призначення з застосуванням дисперсних техногенних продуктів. Цьому напрямку роботи присвячено 17 монографій і навчальних посібників з використанням отриманих на кафедрі наукових результатів, а також до 200 наукових статей та доповідей.

Експериментальні дослідження, що проводяться на кафедрі дають підстави для певних теоретичних і методологічних узагальнень. Ці узагальнення використані при підготовці відповідних монографій та навчально-довідкової літератури.

Серед них слід відзначити такі монографії як "Основи бетонознавства", що видані українською, російською та англійською мовами, Mathematical Planning in Concrete Technology (USA). The main Properties in Concrete technology (Німеччина),(математичне планування експериментів в технології бетону, основні властивості цементних бетонів)"Теоретичні основи будівельного матеріалознавства","Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони","Цементные бетоны с минеральными наполнителями", "Расчетное проектирование свойств и проектирование составов бетона", Практическая методология проектирования составов бетона","Ефективні технології бетонів та розчинів із застосуванням техногенної сировини" та ін.

За результатами науково-дослідницької роботи кафедри підготовлений та виданий комплекс довідників які широко використовуються в практичній роботі спеціалістів на виробництві та в учбовому процесі. З них можна виділити такі довідники як "Материалы и изделия в сельском строительстве", "Практическое руководство по бетону", "Практическое бетоноведение в вопросах и ответах", "Современные отделочные и облицовочные материалы", "Опоряджувальні матеріали", "Будівельне матеріалознавство. Цементи, бетони і розчини", "Довідник з будівельного матеріалознавства", "Випробування бетонів і розчинів. Проектування їх складів", "Бетонознавство: питання і відповіді","Будівельне матеріалознавство.

Українсько-англійський та російсько-англійський довідники". Рекомендації з проектування залізобетонних конструкцій фортифікаційних споруд та ін.

За результатами виконаних на кафедрі досліджень отримано 31 авторських свідоцтв на винаходи і 84 Патентів України на корисні моделі.

Кафедра ТБВіМ активно продовжує працювати за всіма основними напрямками і сподівається на нові досягнення і перемоги.

Директор Навчально-наукового інституту
будівництва та архітектури,
к.т.н., доцент **Макаренко Р.М.**

Доцент кафедри технології будівельних
виробів і матеріалознавства,
к.т.н., доцент **Житковський В.В.**

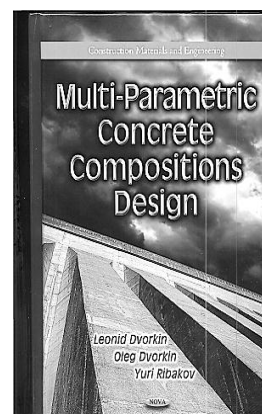
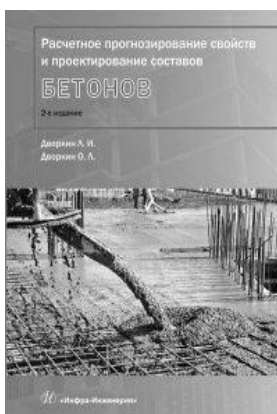
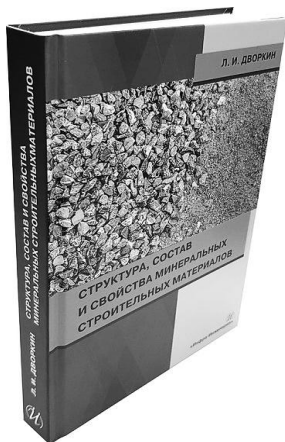
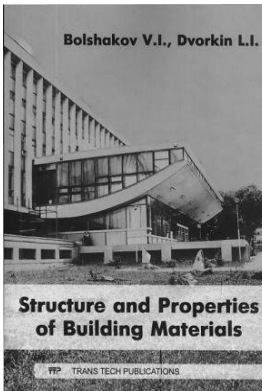
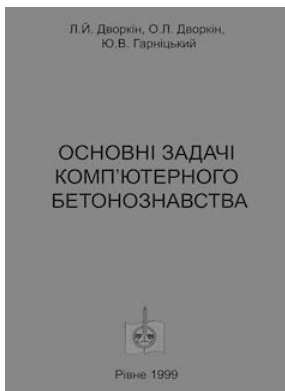
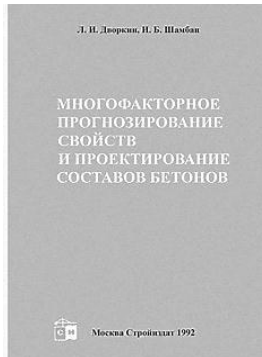
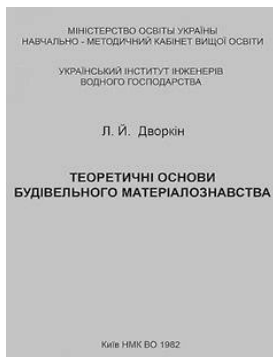
Творчий доробок колективу кафедри ТБВіМ за 35 років

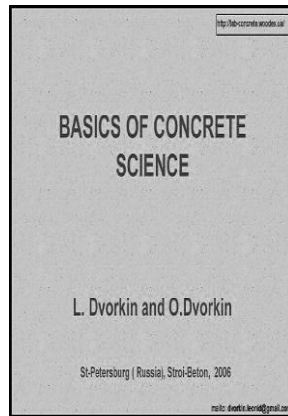
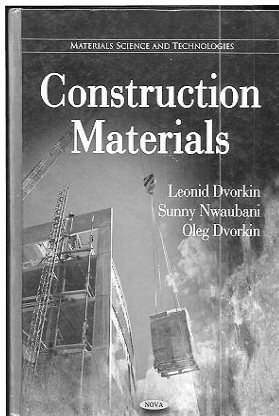
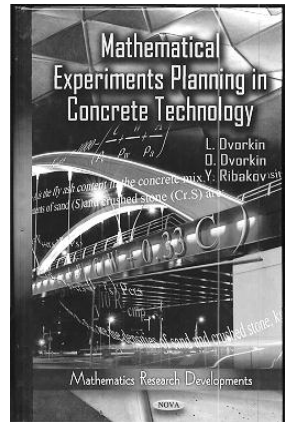
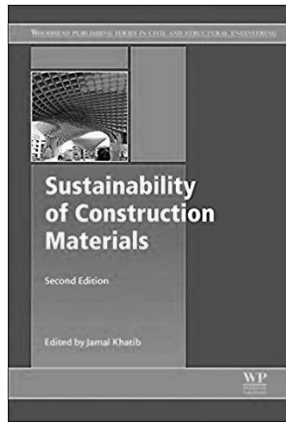
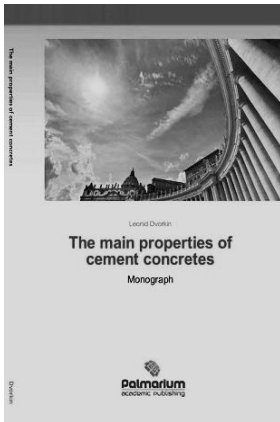
Основні наукові розробки кафедри ТБВіМ

1. Склади бетонів для атомних електростанцій
2. Комп'ютерна система проектування і управління складами бетону
3. Технологія ефективних литих бетонів
4. Технологія ефективних золовмісні в'язучих, бетонів і розчинів
5. Теорія управління структуроутворенням і властивостями цементних систем при введенні мінеральних наповнювачів
6. Технологія ефективних будівельних матеріалів на основі фосфогіпсу, лляної костри, азбестоцементних відходів, топливних і ваграночних шлаків та інших промислових і сільськогосподарських відходів.
7. Технологія активованих малоцементних зольних та шлакових бетонів
8. Методологія проектування складів бетонів та розчинів з застосуванням методів математичного планування експериментів
9. Методологія багатопараметричного проектування складів різних видів бетонів і розчинів
10. Технології ефективного використання відсівів каменеподрібнення для отримання високоякісних бетонів та розчинів
11. Технологія безвипалювальних в'язучих та петроцементів
12. Технологія ефективних гіпсових і сульфатно-активованих в'язучих, бетонів і розчинів на їх основі
13. Ефективні в'язучі і бетони з добавкою метакаоліну і поліфункціональних модифікаторів
14. Технологія бетонів на основі наджорстких бетонних сумішей і вібропресованих бетонів
15. Технологія сухих будівельних сумішей з застосуванням дисперсних техногенних матеріалів
16. Технологія високоміцних дрібнозернистих бетонів з застосуванням місцевої сировини
17. Технологія високоміцних фібробетонів
18. Технологія високоміцних реактивних порошкових бетонів і сумішей на їх основі

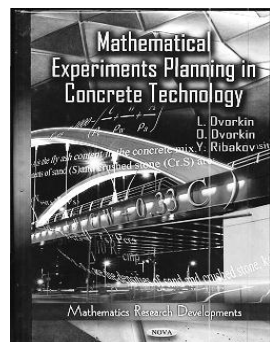
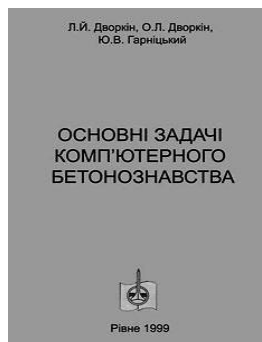
Роботи кафедри за основними напрямками:

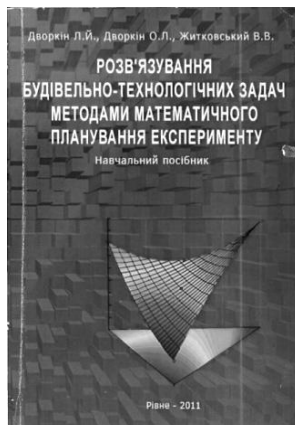
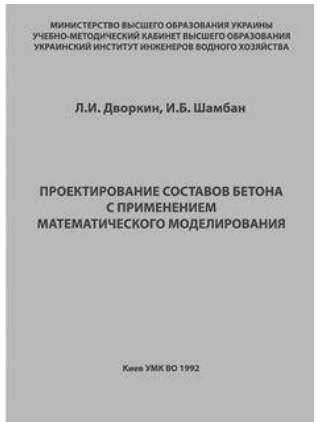
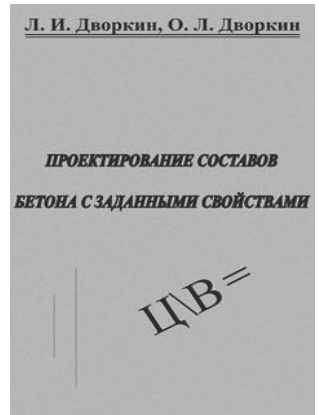
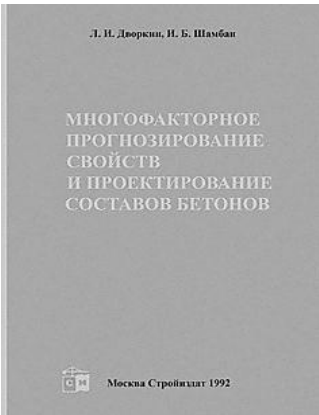
1. Дослідження основних теоретичних закономірностей

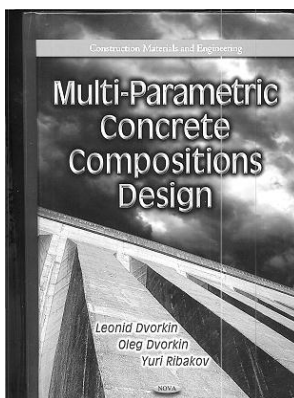
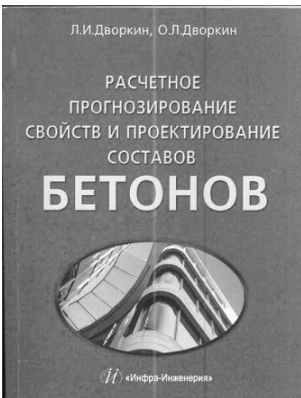




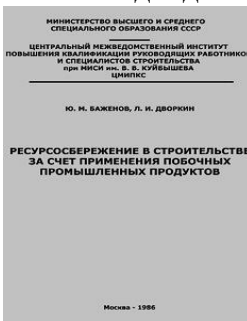
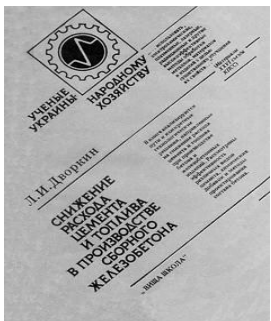
2. Методологія проектування складів бетонів

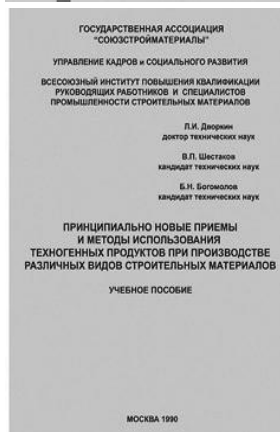
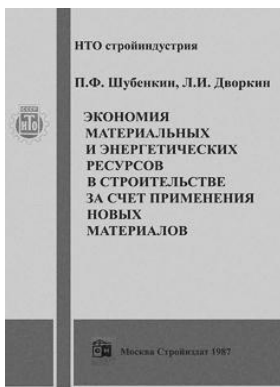
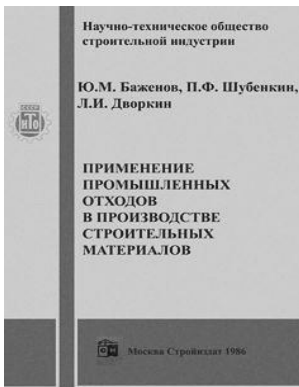


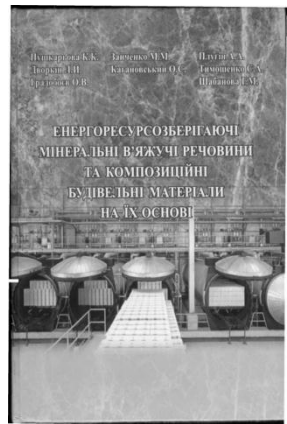
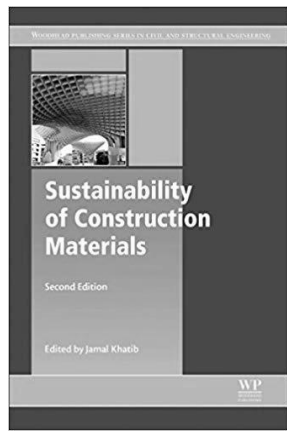
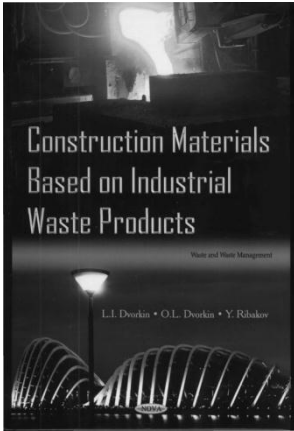
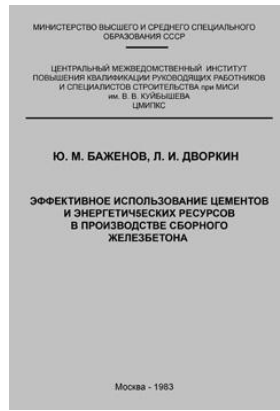
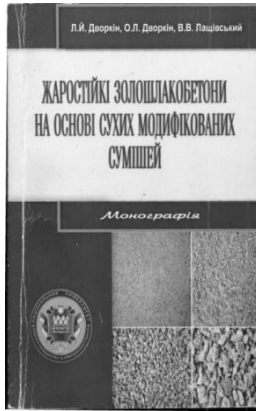


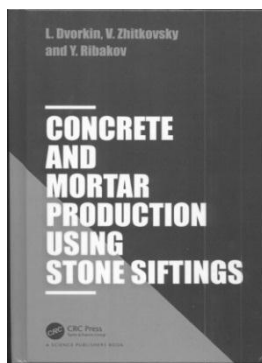
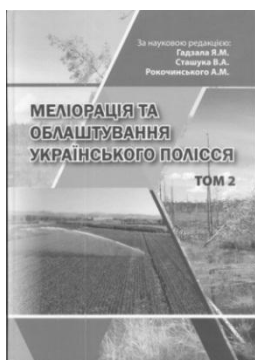


3. Ресурсозбереження та застосування промислових відходів

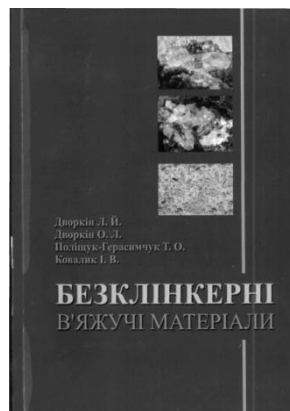


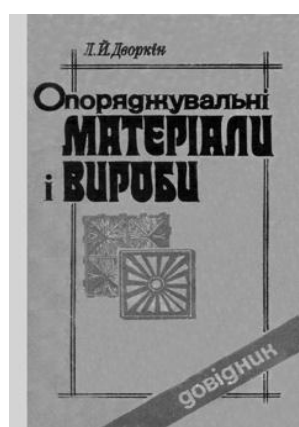
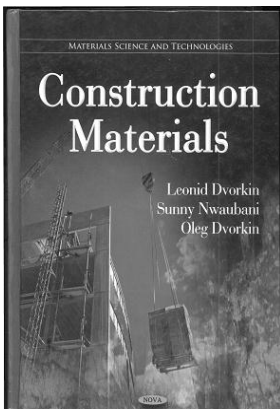






4. Розробка ефективних технологій в'язучих, бетонів та розчинів







Матеріали XI науково-практичного семінару
«СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ
ТА СКЛАД БЕТОНУ»



ВИСОКОМЦІНІ БЕТОНИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ЗОЛО-ШЛАКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

HIGH-STRENGTH CONCRETE USING ASH AND SLAG MATERIALS

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Dvorkin L.I., doctor of techn.science, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

В статті розглянуто можливість покращення властивостей бетону на композиційному золовмісному цементі (КЦ) і малоклінкерному шлакопортландцементі (МШПЦ) введенням комплексних хімічних добавок. Показана ефективність введення в склад КЦ добавки поліфункціонального модифікатора (ПФМ), що включає інтенсифікатор помелу і суперпластифікатора, а також сульфатно-фторидно-лужної активізації МШПЦ.

The article considers the possibility of improving the properties of concrete on composite ash-containing cement (CC) and low-clinker slag Portland cement (LSC) with the introduction of complex chemical additives.

The pozzolanic activity of CC and its degree of hydration increases with increasing dispersion of cement with the introduction of a complex additive of a polyfunctional modifier (PFM) during grinding, including a grinding intensifier - propylene glycol and superplasticizer. Analysis of mathematical models of water demand and strength of concrete with PFM additive showed the possibility of a significant reduction in water demand and increase the strength of concrete based on ash-containing CC with the introduction of PFM additive.

For low-clinker slag Portland cement (LSC), a significant effect of increasing strength is achieved by sulfate-fluoride-alkaline activation. It is provided when phosphogypsum, sodium silicon fluoride and lime are introduced into the composition of cement. A complex of mathematical models of workability indicators and compressive strength of concrete was obtained on activated LSC under normal hardening and after heat and moisture treatment.

For concrete based on CC with the addition of PFM and activated LSC, the possibility is shown for designing concrete mixes on the basis of the obtained models. Relevant examples are provided.

Ключові слова: високоміцні бетони, композиційний цемент, малоклінкерний шлакопортландцемент, поліфункціональний модифікатор, сульфатно-фторидно-лужна активізація.

High-strength concrete, composite cement, low-slag Portland cement, polyfunctional modifier, sulfate-fluoride-alkaline activation.

Вступ. Як відомо, на даний час до високоміцних бетонів відносять бетони з міцністю при стиску у 28-добовому віці 60...100 МПа і вище [1, 2]. У відповідності з класичною технологією, отримання високоміцних бетонів можливе при забезпеченні високої якості вихідних матеріалів, низьких значень водоцементного відношення та достатнього ущільнення бетонної суміші. Ці вимоги на практиці досягаються зменшенням водовмісту бетонної суміші при застосуванні жорстких сумішей, або введенням пластифікуючих добавок, підвищенням активності і питомої поверхні цементу, введенням прискорювачів тверднення, зменшенням водопотреби і оптимізацією зернового складу заповнювачів з високими фізико-механічними властивостями [1-6].

Технологія високоміцних бетонів нового покоління передбачає введення до складу бетонних сумішей добавок суперпластифікаторів з високим (20...40%) водоредукуючим ефектом і дисперсних активних мінеральних наповнювачів. Ці компоненти забезпечують як важливі індивідуальні ефекти, а саме досягнення гранично низьких значень водоцементного ефекту при збереженні легкоукладальності, збільшення об'єму гідратних новоутворень та ступеню гідратації цементу, так і суттєвий синергетичний ефект. При сумісному введенні добавок суперпластифікатора і дисперсного активного наповнювача, з одного боку повністю реалізується реологічний потенціал пластифікуючої добавки [7, 8], а з іншого – в умовах обмеженого водоцементного відношення проявляється позитивний вплив дисперсного наповнювача на структуроутворення цементного каменю і бетону.

В.І. Калашніков запропонував теорію порошково-активованих бетонів, в основі якої лежить експериментально обґрунтований висновок про суттєве покращення реологічних властивостей цементної матриці, наповненої дисперсними компонентами в умовах обмеженого водовмісту, що забезпечується добавкою суперпластифікатора [9].

Нами сумісно з В.І. Соломатовим і В.Н. Вировим запропонована структурна теорія цементних бетонів з мінеральними наповнювачами [10]. Відповідно до цієї теорії дисперсні мінеральні наповнювачі активно впливають на властивості цементних систем на мікро-, мезо- та макрорівнях їх структури. При цьому позитивний ефект цього впливу особливо проявляється з підвищенням дисперсності наповнювача в умовах низьких В/Ц.

У гідратаційних системах на фізичну взаємодію частинок цементу і наповнювача суттєво впливають так звані "стиснені умови" [11], які відрізняються різким збільшенням концентрації твердої фази і переходом частини об'ємної води у плівкову. При цьому зміна вільної поверхневої енергії між твердою і рідкою фазами сприяє інтенсивному утворенню зародків кристалів гідратних новоутворень відповідно з теорією Гіббса-Фольмера [12]. При оптимальній концентрації і дисперсності наповнювача утворюється дрібнозерниста структура зв'язуючого, що має позитивний вплив на технічні властивості штучного каменю.

Одним з основних структурних параметрів цементних композитів є міцність контактної зони. Відстань між суміжними елементами жорсткого каркаса заповнювачів бетону регулюється, в основному, питомим вмістом цементу в бетоні і водоцементним відношенням. У відомих дослідах [13] було показано, що зменшення міжзернових відстаней в розчинах на кварцовому піску з 210 до 30 мкм дозволяє в 1,5...2 рази збільшити твердість цементного каменю, що зв'язує зерна заповнювача. Без дисперсного наповнювача досягнути такого тонкого прошарку цементного каменю в бетонах досить важко, оскільки необхідний високий ступінь опіснення бетонної суміші за рахунок відношення між вмістом цементу і заповнювачів, що значно погіршує умови приготування бетонної суміші і формування виробів.

Структуруючий вплив дисперсних наповнювачів в бетонах підвищується при збільшенні фізико-хімічної активності їх поверхні. До способів механічної активації наповнювачів відноситься сумісний помел або домел їх з цементом в присутності пластифікуючих, а при необхідності і інших хімічних добавок. Такий спосіб активації покладений в основу отримання композиційних цементів низької водопотреби [14, 15].

Важливим критерієм якості бетонів як конструкційних матеріалів є питома витрата цементу на одиницю міцності бетону. У традиційних бетонах цей критерій в середньому наближається до 10 кг/МПа, у бетонах нового покоління він зменшується у 2 і більше разів.

З активних наповнювачів для високоміцних бетонів, як показує практика і результати багатьох досліджень найбільш ефективними є мікрокремнеземисті добавки [16-18]. З мікрокремнеземистих наповнювачів найбільш поширеним є конденсований аерозоль – відхід виробництва феросплавів. Він вловлюється фільтрами систем газоочистки плавильних металургійних печей і містить частинки сферичної форми з середнім діаметром 0.1 мкм і питомою поверхнею 15-25 м²/г і вище. Його насипна густина 150-250 кг/м³. За хімічним складом мікрокремнезем представлений аморфізованим кремнеземом, вміст якого перевищує 85 і досягає 98 %. Унікальна питома поверхня в сполученні з аморфізованою структурою частинок, наявністю таких домішок як карбід кремнію, які мають високу поверхневу енергію,

обумовлюють високу структуруючу і реакційну здатність цього матеріалу порівняно з іншими активними мінеральними наповнювачами [19]. Разом з тим застосування мікрокремнезему ускладнюється необхідністю його гранулювання або брикетування до транспортування і дозування, суттєвими коливаннями його складу та властивостей.

В Україні відсутні постачальники вітчизняного мікрокремнезему як стабільного товарного продукту, імпорتنний має високу вартість і застосування його для масового виробництва є проблематичним. Тому в якості активних наповнювачів для високоміцних бетонів практичний інтерес представляє використання дисперсних кремнеземистих і алюмокремнеземистих матеріалів на основі місцевої сировини і відходів промислового виробництва. З таких матеріалів найбільш поширеними є зола та доменний гранульований шлак. Основним завданням нашої роботи була розробка технологічних параметрів отримання високоміцних бетонів на малоклінкерних золо- та шлаковмісних цементях і вивчення комплексу їх будівельно-технічних властивостей.

Матеріали і методи досліджень. Основні дослідження були виконані із застосуванням двох видів цементів (ЕН 197-1):

1) композиційного СЕМV/A з вмістом золи-виносу 30 %, доменного шлаку – 20 % і клінкеру – 50 %. (Вміст гіпсу понад 100 % у перерахунку на SO_3 складав 3.5 %);

2) шлакопортландцементу СЕМ III/C, з вмістом доменного шлаку 88 % і клінкеру 12 %. (Вміст гіпсу понад 100 % у перерахунку на SO_3 складав 4.5 %).

В дослідженнях використовували портландцементний клінкер ВАТ "Волинь" з мінералогічним складом: C_3S – 63.95 %; C_2S – 15.15 %; C_3A – 7.42 %, C_4AF – 12.48 %.

Застосовували золу-виносу Бурштинської ТЕС і доменний гранульований шлак Криворізького металургійного комбінату з хімічним складом:

– зола виносу: $(SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3)$ – 85.8 %, SO_3 – 2.3 %, CaO^* – 2.8 %, MgO – 2 %, $Na_2O + K_2O$ – 1.2 %, В.П.П. – 5.1 %;

– доменний шлак: SiO_2 – 39.5 %, Al_2O_3 – 6.4 %, Fe_2O_3 – 0.2 %, CaO – 47.2 %, MgO – 3.1 %, MnO – 1.1 %, SO_3 – 1.7 %.

Для регулювання властивостей композиційних цементів і бетонів на їх основі вивчали вплив добавок суперпластифікаторів нафталін формальдегідного (СП-1) і полікарбоксилатного (Sika VC 225) типів [20] та інтенсифікатору помола – пропіленгліколя (ПГ) [21]. Для бетонів на основі малоклінкерного шлакопортландцементу вивчали вплив крім суперпластифікаторів активізаторів твердіння доменного шлаку – кремнійфториду натрія та негашеного вапна.

Для аналізу впливу складу в'язучих та бетонів, а також добавок-модифікаторів при нормальних умовах твердіння і в умовах теплової обробки

отримували за допомогою методу математичного планування [22] експериментально-статистичні моделі. Комплекси отриманих моделей використали для розробки методології проектування складів високоміцних бетонів на малоклінкерних композиційних і шлакопортландцементях.

Експериментальні результати та їх аналіз.

Бетони на основі композиційних цементів (КЦ) із золошлаковою мінеральною добавкою. Золошлакова композиційна добавка у складі композиційних цементів відіграє активну роль завдяки пуцолановій активності та впливу на утворення структури штучного каменю. Досліди на цементях лабораторного помелу показали, що пуцоланова активність золошлакової композиції у складі цементу найбільш суттєво залежить від тонкості помелу, що характеризується питомою поверхнею ($S_{\text{питт}}$), і в меншій мірі від співвідношення зола:шлак (Табл.1). Разом з тим, зменшення співвідношення золи до шлаку значно впливає на кінетику зв'язування CaO збільшуючи кількість зв'язаної CaO особливо в період від 7 до 28 діб.

Таблиця 1

Пуцоланова активність золи-виносу та зола шлакової композиції

№	Матеріал	$S_{\text{питт}}$, м ² /кг	Поглинання CaO мг/г		
			7 діб	28 діб	60 діб
1	Зола-виносу	350	15	52	78
2	Зола-виносу	450	18	65	97
3	Зола-виносу	550	25	90	135
4	Зола виносу + шлак (1:1)	350	20	70	83
5	Зола виносу + шлак (2:1)	350	17	63	81
6	Зола виносу + шлак (1:1)	450	21	83	105
7	Зола виносу + шлак (2:1)	450	19	73	101

Досягнення підвищеної питомої поверхні композиційних цементів при мінімізації енергозатрат можливо при застосуванні добавок-інтенсифікаторів помелу [21]. В якості такої добавки поширення набув пропіленгліколь (ПГ).

Поряд з додавкою пропіленгліколя певний вплив на кінетику помелу і зерновий склад цементів мають добавки суперпластифікаторів та їх композицій з ПГ. Результати дослідів наведені на Рис.1 та в Табл.2.

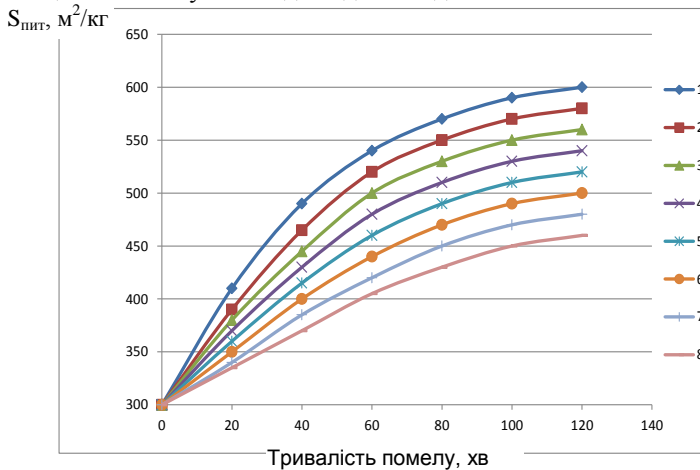


Рис.1. Вплив добавок на питому поверхню КЦ при різній тривалості помелу.
 1 – ПГ – 0.04 %, Sika VC 225 – 0.5 %; 2 – ПГ – 0.04 %, Sika VC 225 – 0.5 %; 3 – ПГ – 0.02 %, Sika VC 225 – 0.5 %; 4 – ПГ – 0.02 %, СП-1 – 0.5 %, ПГ – 0.04 %; 5 – СП-1 – 0.5 %, ПГ – 0.04 %; 6 – СП-1 – 0.5 %; 7 – Sika VC 225 – 0.5 %; 8 – без добавок

Таблиця 2

Зерновий склад композиційних цементів

№ з/п	Добавки	Вміст фракцій, %				
		<10 мкм	10...20 мкм	20...40 мкм	40...60 мкм	>60 мкм
1	ПГ – 0.04 %, Sika VC 225 – 0.5 %;	35.5	33.1	15.5	12.4	3.3
2	ПГ – 0.04 %	31.2	36.4	14.2	14.6	3.6
3	ПГ – 0.02 %, Sika VC 225 – 0.5 %;	28.2	36.1	16.7	15.1	3.9
4	ПГ – 0.02 %	26.5	33.7	18.4	17.2	4.2
5	ПГ – 0.04 %, СП-1 – 0.5 %	29.8	35.5	14.3	15.8	4.6
6	СП-1 – 0.5 %	22.8	35.1	19.6	17.3	5.4
7	Sika VC 225 – 0.5 %	17.4	36.6	21.8	17.5	6.7
8	Без добавок	15.6	35.5	22.5	18.2	8.2

Введення добавки пропіленгліколя практично вдвічі збільшило вміст найбільш тонкої фракції цементу. Композиційні добавки ПГ + Sika VC 225

забезпечують зерновий склад цементу, що незначно відрізняється від зернового складу цементу з одинарною добавкою ПГ. Введення в цемент суперпластифікатору нафталін-формальдегідного типу також певною мірою інтенсифікує помел цементу, хоча цей ефект значно поступається ефекту добавки пропіленгліколя.

Збагачення композиційного цементу під час помелу найбільш тонкими фракціями суттєво прискорює його гідратацію. Про це свідчать результати дослідів по визначенню вмісту гідратної води в зразках цементного каменю з В/Ц = 0.3 при різній тривалості їх твердіння (Рис.2).

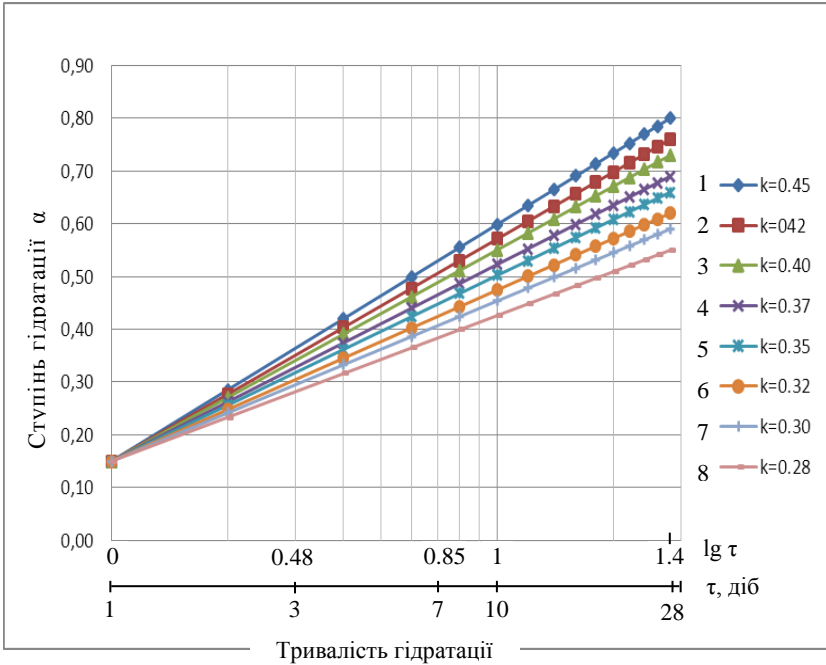


Рис.2. Вплив тривалості гідратації на ступінь гідратації композиційних цементів (α) (нумерація ліній приведена для цементів згідно Рис.1)

Кінетику гідратації композиційних цементів, домелених з добавками ПГ, суперпластифікаторів СП-1 і Sika VC 225 можна апроксимувати рівнянням загального типу:

$$\alpha = k \lg \tau + B, \quad (1)$$

де τ – тривалість гідратації; k і B – коефіцієнти, що залежать від виду добавок і зернового складу цементів.

Комплексні добавки, що включають інтенсифікатор помелу (ПГ) і суперпластифікатори СП-1 і Sika VC 225 можна розглядати як поліфункціональні модифікатори цементу (ПФМ):

- ПФМ₁ – ПГ + Sika VC 225;
- ПФМ₂ – ПГ+СП-1.

Значення основних властивостей композиційних цементів, що отримані помелом в лабораторному кульовому млині при однаковій тривалості без добавок ПФМ і з добавками ПФМ₁ та ПФМ₂ приведені в Табл.3. З них випливає, що міцність композиційного цементу з вмістом клінкеру 50 % при введених добавки ПФМ₁ і $S_{\text{пит}}=450 \text{ м}^2/\text{кг}$ досягає у 28 добовому віці марки 600, $S_{\text{пит}}=550 \text{ м}^2/\text{кг} - 700$, при введених добавки ПФМ₂ відповідно 550 і 600. При цьому в 3-добовому віці міцність цементів з добавкою ПФМ₁ досягає 50% марочної. Цей ефект є результатом підвищення реакційної здатності цементів за рахунок збільшення їх питомої поверхні і збагачення найбільш дрібними фракціями, а також зменшення нормальної густоти і відповідно необхідних значень В/Ц для досягнення заданої рухомості розчинових сумішей.

Таблиця 3

Основні властивості композиційних цементів (КЦ)

№ з/п	Питома поверхня $S_{\text{пит}}, \text{ м}^2/\text{кг}$	Добавка ПФМ, %	Нормальна густота, %	Границя міцності на стиск/згин, МПа у віці, діб			
				1	3	7	28
1	350	без добавок	27.8	15.5 / 2.5	22.4 / 3.2	31.6 / 4.1	41.5 / 5.8
2	450	- // -	28.3	19.3 / 3.1	25.5 / 3.6	39.7 / 4.8	52.3 / 6.2
3	450	ПФМ ₁ (ПГ – 0.04%, Sika VC 225 – 0.5%)	18.5	24.7 / 4.1	32.3 / 4.8	45.8 / 5.6	61.5 / 6.7
4	550	- // -	19.7	30.3 / 4.3	39.6 / 4.9	50.6 / 6.1	71.8 / 7.5
5	450	ПФМ ₂ (ПГ – 0.04 %, СП-1-0.5 %)	21.5 / 3.1	21.8 / 3.6	28.3 / 4.1	37.4 / 4.6	57.8 / 6.8
6	550	- // -	22.8 / 3.2	25.2 / 3.9	31.3 / 4.2	41.2 / 5.6	61.3 / 7.2

Дослідження властивостей бетонних сумішей і бетонів на модифікованому композиційному цементі було виконано за допомогою математичного планування експериментів [22]. До складу цементів при їх

помелі вводили добавку ПФМ₁ вміст інтенсифікатору помелу – пропіленгліколя складав 0.04 % від маси цементу.

Для отримання бетонних сумішей крім композиційного цементу з добавкою ПФМ₁, вмістом клінкеру 50%, шлаку 20 % і золи-виносу 30 % використані заповнювачі: кварцовий пісок з модулем крупності $M_k=1.95$ і гранітний щебінь з $D_{max} = 20$ мм. При дослідженні бетонних сумішей і бетонів був реалізований трирівневий план В₄ [21]. Умови планування експериментів наведені в Табл.4.

Таблиця 4

Умови планування експериментів при отриманні моделей водопотреби бетонної суміші і міцності бетону на КЦ

№ з/п	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Вміст добавки ПФМ ₁ у КЦ, %	X_1	0.4	0.7	1.0	0.3
2	Питома поверхня КЦ, $S_{питг}$, м ² /кг	X_2	350	450	550	100
3	Водоцементне відношення, В/Ц	X_3	0.25	0.35	0.45	0.1
4	Рухомість суміші, ОК, см	X_4	2	13	24	11

Після реалізації і статистичної обробки експериментів отримані математичні моделі водопотреби бетонної суміші (В) і міцності бетону на стиск у віці 1 (f'_{cm}) і 28 діб (f_{cm}^{28}):

$$\hat{A} = 142.1 - 22X_1 + 4.17X_2 - 10.1X_3 + 17.1X_4 + 6X_1^2 + 1.5X_2^2 + 6.6X_3^2 - 1.5X_4^2 + 0.6X_1X_2 - 0.6X_1X_3 + 1.3X_2X_3 - 0.3X_2X_4 + 0.4X_3X_4 \quad (2)$$

$$f'_{cm} = 33.1 + 1.3X_1 + 8.9X_2 - 7.5X_3 - 1.2X_1^2 - 4.1X_2^2 + 2.8X_3^2 + 0.3X_1X_2 - 0.3X_1X_3 - 2.5X_2X_3 \quad (3)$$

$$f_{cm}^{28} = 70.9 - 0.3X_1 + 9.8X_2 - 13.8X_3 - 2.5X_1^2 - 4.28X_2^2 + 3.78X_3^2 + 3.9X_2X_3 \quad (4)$$

Для моделей міцності бетону на стиск вплив рухомої бетонної суміші за умови постійних значень інших варійованих факторів виявився статистично незначущим.

За зниженням впливу на вивчені властивості фактори можна розташувати в наступній послідовності:

$$\hat{A} : X_1 > X_4 > X_3 > X_2$$

$$f'_{cm} : X_2 > X_3 > X_1$$

$$f_{cm}^{28} : X_3 > X_2 > X_1$$

При аналізі моделей водопотреби бетонної суміші (Рис.3, 4) звертають увагу практично однакові значення водопотреби бетонної суміші в інтервалі $V/C = 0.45-0.35$ і суттєво її зростання при $V/C < 0.35$, що підтверджує відоме [2] правило постійності водопотреби в бетонних сумішах при $V/C < V/C_{\text{критичне}}$. Модель водопотреби також відображає зростання водопотреби бетонної суміші в міру зростання питомої поверхні цементу.

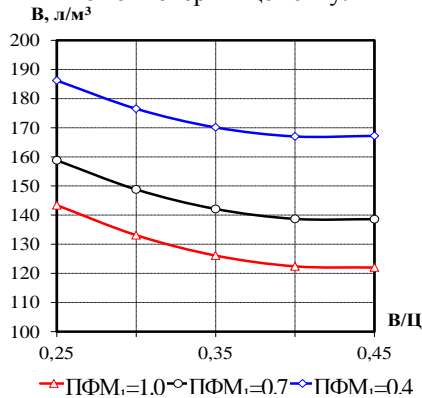


Рис.3. Вплив V/C і добавки ПФМ₁ на водопотребу бетонної суміші

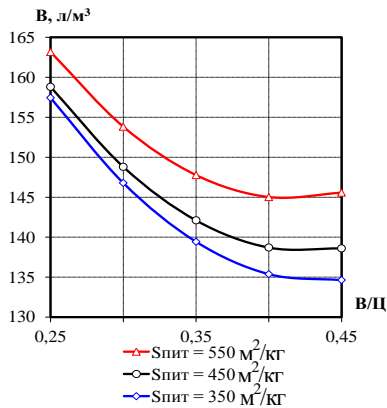


Рис.4. Вплив V/C і питомої поверхні КЦ на водопотребу бетонної суміші (ПФМ₁=0.7%, ОК=13 см)

Аналіз математичних моделей міцності (Рис. 5-7) показує безумовне провідне значення факторів В/Ц і $S_{\text{пит}}$. Вплив питомої поверхні КЦ суттєво зростає для однодобової міцності бетону. При підвищених значеннях $S_{\text{пит}}$ вплив збільшення В/Ц на ранню міцність бетону стає менш значимим (Рис. 5).

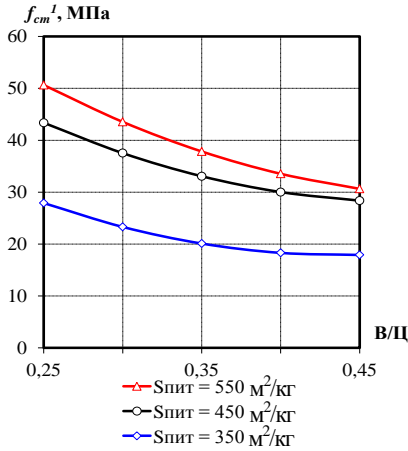


Рис.5. Вплив В/Ц і питомої поверхні на міцність бетону при стиску у віці 1 доби ($\text{ПФМ}_1=0.7\%$)

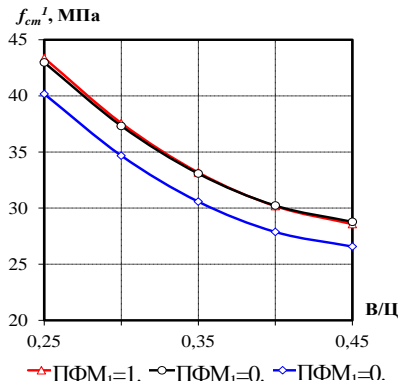


Рис.6. Вплив В/Ц і вмісту ПФМ₁ на міцність бетону при стиску у віці 1 доби ($S_{\text{пит}}=450 \text{ м}^2/\text{кг}$)

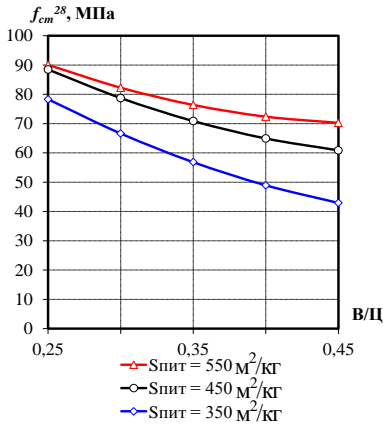


Рис. 7. Вплив В/Ц і питомої поверхні на міцність бетону при стиску у віці 28 діб (ПФМ₁=0.7)

Моделі дають змогу проектувати склади бетонної суміші на КЦ з добавкою ПФМ, заданої рухомості та міцності.

Приклад 1.

Необхідно запроєктувати склад бетону класу С 40/50 при міцності на стиск в однодобовому віці не менше 30% 28 добової міцності з рухомістю бетонної суміші за осадкою конуса ОК=13 см при використанні композиційного цементу з $S_{пнт}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$ та вмісту ПФМ₁ 0,7% від маси цементу. Матеріали: щебінь гранітний фракції 5...20 мм з $\rho_{щ}=2720 \text{ кг}/\text{м}^3$ та $\rho_{н.щ}=1350 \text{ кг}/\text{м}^3$, пісок середньої крупності з $\rho_{п}=2650 \text{ кг}/\text{м}^3$.

1. Знайдемо необхідну середню міцність бетону класу С 40/50, визначену на зразках кубах з коефіцієнтом варіації 13,5 % [2].

$$f_c^{28}=50 : 0,778=64,3 \text{ МПа}$$

2. При витраті добавки ПФМ₁=0,7% ($X_1=0$) і питомій поверхні КЦ $S_{пнт}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$ ($X_2=-1$) з моделі 4 розраховуємо необхідне В/Ц.

$$B/C=0,311$$

При $B/C=0,311$ ($X_3=-0,39$), $S_{пнт}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$ ($X_2=-1$), а також рухомості суміші ОК=13 см ($X_4=0$) міцність бетону в однодобовому віці з моделі 3 становить 22,4 МПа, що перевищує 30% f_c^{28} . Таким чином для подальших розрахунків приймаємо $B/C=0,311$.

3. За допомогою моделі 2 при $X_1=0$, $X_2=-1$, $X_3=-0,39$, $X_4=0$ знайдемо водопотребу бетонної суміші

$$B=145 \text{ л}/\text{м}^3$$

4. Витрата цементу:

$$C = \frac{B}{B/C} = \frac{145}{0,311} = 466 \text{ кг}/\text{м}^3$$

5. Знайдемо витрату щебеню і піску, застосувавши відомі формули [1, 2].

$$\Pi = \frac{1000}{\alpha \frac{V_{\text{ш}}^{\text{п}}}{\rho_{\text{шц}}} + \frac{1}{\rho_{\text{ц}}}} = \frac{1000}{1,375 \frac{0,5}{1,35} + \frac{1}{2,72}} = 1140 \text{ кг/м}^3$$

де α – коефіцієнт розсуву зерен крупного заповнювача, $V_{\text{ш}}^{\text{п}}$ – міжзернова пористість щебеню.

$$P = (1000 - (\frac{C}{\rho_{\text{ц}}} + B + \frac{\Pi}{\rho_{\text{шц}}})) \rho_{\text{н}} = (1000 - (\frac{466}{3,1} + 145 + \frac{1140}{2,72})) \times 2,65 = 757 \text{ кг/м}^3.$$

Розрахунковий склад бетону, кг/м³: Ц=466 кг/м³, В=145 кг/м³, Ш = 1140 кг/м³, П=757 кг/м³, ПФМ₁=466×0,007 = 3,26 кг/м³ (ПГ=0.0004Ц=0.18 кг/м³, СП=0.0066Ц=3.07 кг/м³).

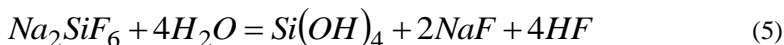
Бетони на основі малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ).

Отримання високоміцних бетонів на основі МШПЦ можливе при суттєвому підвищенні активності в'язучого. Відомий ряд способів активізації шлакових в'язучих: підвищення питомої поверхні і особливо клінкерної складової, що досягається двохстадійним помелом, введення добавок лужних, лужно-земельних, сульфатних сполук, хлоридів та фторидів. Кожен з цих способів має певні особливості, переваги та недоліки [23, 24].

В даній роботі досліджували ефективність комплексної сульфатно-фторидної та сульфатно-фторидно-лужної активізації МШПЦ і властивості бетонів на активізованих МШПЦ.

В якості сульфатного компонента в'язучого застосовували фосфогіпс – побічний продукт обробки апатитового концентрату сірчаною кислотою при отриманні ортофосфорної кислоти [19]. Фосфогіпс містив 94.5 % двоводного гіпсу, а також домішки фосфатів фтористих солей та кремнезему. Фторидним активізатором МШПЦ слугував кремнефторид натрію (Na_2SiF_6).

Сильний вплив Na_2SiF_6 на міцність МШПЦ можна пояснити появою значної кількості гелю $Si(OH)_4$ при гідролізі Na_2SiF_6 у воді за реакцією:



Отриманий гель активно взаємодіє з МШПЦ з утворенням низькоосновних гідросилікатів. Фтористі солі взаємодіють з адсорбованими на поверхні частинок шлаку молекулами води, замінюючи ОН-групу на F іон. В результаті, також активізуються реакції гідратації шлакового скла [11].

Вплив складу в'язучих при сульфатно-фторидній активізації МШПЦ вивчали за допомогою планованих відповідно до плану В₄ [21] експериментів, умови планування наведені в Табл.5.

Таблиця 5

Умови планування експериментів при отриманні моделей міцності МШПЦ

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Вміст клінкеру, %	x_1	5	12	19	7
2	Вміст фосфогіпсу в перерахунку на SO_3 , %	x_2	3,03	4,5	5,97	1,47
3	Питома поверхня в'язучого, m^2/kg	x_3	350	450	550	100
4	Вміст активатора твердіння (Na_2SiF_6), %	x_4	0	2	4	2
5	Вміст суперпластифікатора СП-1, %	x_5	0	0,5	1	0,5

Отримані експериментально-статистичні моделі стандартних цементно-піщаних розчинів на основі МШПЦ на стиск у віці 7 та 28 діб наведені в Табл.6.

Таблиця 6

Математичні моделі міцності активованого МШПЦ

Вихідні параметри	Математичні моделі
Міцність на стиск у віці 7 діб, МПа	$f_c^7 = 19.8 + 1.8X_1 - 2.2X_2 + 2.9X_3 - 0.1X_4 + 0.9X_5 - 3.1X_1^2 - 1.4X_2^2 - 1.1X_3^2 - 2.3X_4^2 + 3.5X_5^2 - 0.7X_1X_2 - 0.4X_1X_3 - 1.9X_1X_4 - 0.3X_1X_5 + 0.3X_2X_3 - 0.8X_2X_4 - 0.5X_2X_5 + 0.7X_3X_4 - 0.4X_3X_5 + 1.9X_4X_5 \quad (6)$
Міцність на стиск у віці 28 діб, МПа	$f_c^{28} = 44 + 5.73X_1 - 0.7X_2 + 1.49X_3 - 0.22X_4 + 1.19X_5 - 6.32X_1^2 - 2.42X_2^2 - 3.22X_3^2 - 4.17X_4^2 + 1.33X_5^2 - 0.65X_1X_2 - 1.53X_1X_3 - 2.69X_1X_4 - 0.55X_1X_5 + 1.28X_2X_3 + 0.4X_2X_4 - 3.65X_2X_5 + 0.86X_3X_4 - 0.2X_3X_5 + 2.91X_4X_5 \quad (7)$

Аналіз моделей (Рис.8) показує, що збільшення вмісту, фосфогіпсу та кремнійфториду натрію в загальній масі в'язучого, при підвищенні його питомої поверхні, позитивно впливає на марочну міцність МШПЦ. Це пов'язано з тим, що в присутності іонів Ca^{2+} і SO_4^{2-} і високої дисперсності

частинок прискорюється гідратація склоподібної фази доменного гранульованого шлаку, внаслідок чого відбувається утворення низькоосновних гідросилікатів кальцію.

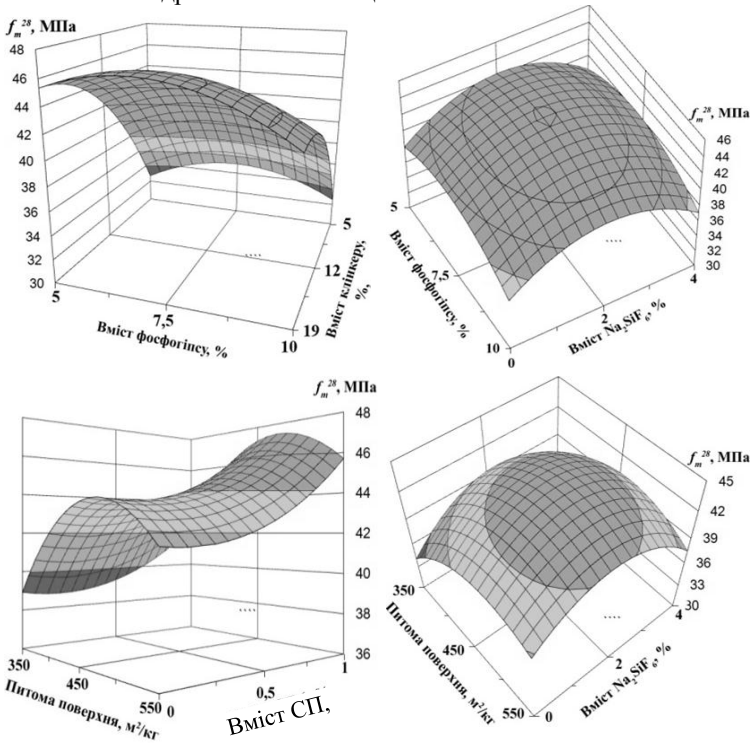
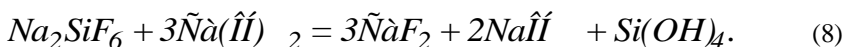


Рис. 8. Вплив технологічних факторів на міцність при стиску МШПЦ у віці 28 діб

Негативно на міцність МШПЦ впливає надмірне збільшення величини питомої поверхні в'язучого, а також витрати добавки кремнійфториду натрію, що обумовлено різким збільшенням В/Ц. Дослідженнями встановлено, що найбільша міцність зразків спостерігається при величині питомої поверхні $450 \text{ м}^2/\text{кг}$, при цьому оптимальна витрата фосфогіпсу та кремнійфториду натрію у в'язучому становить 7,5% (4,5% в перерахунку на SO_3) і 2% відповідно.

Представляла інтерес можливість підсилення ефекту сульфатно-фторидної активації шлаків, при застосуванні добавки кремнійфториду натрію (Na_2SiF_6), шляхом додаткового введення $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в МШПЦ. Із загальнохімічних позицій в такій системі повинна пройти хімічна реакція:



В розчині тверднучого цементу поряд з фторидом кальцію (CaF_2) утворюється їдкий луг (NaOH), який забезпечує додаткову лужну активацію. Результати дослідження ефективності сульфатно-фторидно-лужної активації (СФЛ) наведені в Табл.7.

Всі дослідження виконувалися на однаковому в'язучому наступного складу: портландцементний клінкер – 12%, доменний гранульований шлак - 88%, фосфогіпс дигідрат – 7,5% (4,5 % в перерахунку на SO_3).

Таблиця 7

Результати випробувань активованого МШПЦ

№	Вид в'язучого	В/Ц	РК, мм	$f_{m,tf}^7$, МПа	f_m^7 , МПа	$f_{m,tf}^{28}$, МПа	f_m^{28} , МПа	pH
1	МШПЦ	0,4	130	2,0	17	5,6	29,4	9,5
2	МШПЦ+Вапно(3%)	0,4	120	3,6	19,9	8,2	36,3	12,5
3	МШПЦ+Вапно(7%)	0,4	200	3,0	17,8	6,9	31,4	12,7
4	МШПЦ+ Na_2SiF_6 (2%)	0,4	120	4,4	24,7	6,7	38,3	10,1
5	МШПЦ+Вапно(3%)+ Na_2SiF_6 (2%)	0,4	115	6,7	28,9	7,2	46,7	12,6
6	МШПЦ+Вапно(7%)+ Na_2SiF_6 (2%)	0,4	115	7,1	24,9	8,5	44,9	12,8

*РК – розплив конуса, $f_{m,tf}^7$, f_m^7 , $f_{m,tf}^{28}$, f_m^{28} – відповідно міцність стандартних цементно-піщаних розчинів при згині та стиску в 7 та 28-добовому віці.

Аналізуючи отримані результати можна зробити висновок, що введення в склад МШПЦ комплексної добавки у вигляді суміші кремнійфториду натрію, та вапна дозволяє суттєво покращити властивості в'язучого та збільшити pH середовища (з 9...10 до 12...13), активність МШПЦ у віці 7 та 28 діб також суттєво збільшується. Забезпечення даних характеристик суттєво розширює межі застосування даного цементу, його можна використовувати для виготовлення залізобетонних конструкцій, так як pH середовища забезпечуватиме пасивацію арматурної сталі в бетоні.

При застосуванні МШПЦ в умовах сульфатно-фторидно-лужної активації (СФЛ) визначали вплив добавки суперпластифікатора Sika VC 225 на легкоукладальність бетонних сумішей та міцність бетону.

Для забезпечення СФЛ активації додатково до складу в'язучого вводили негашене вапно, в кількості 3 % від маси в'язучого, та кремнійфторид натрію в кількості 2 %. Активність в'язучого з питомою поверхнею 450 м²/кг складала 46 МПа.

В якості заповнювачів для бетону використовувались гранітний щебінь Клесівського родовища з максимальною крупністю зерен 20 мм та пісок Нетішинського кар'єру з $M_{кр}=1,9$.

Умови планування експериментів і математичні моделі показників легкоукладальності та міцності бетонів на МШПЦ при СФЛ активації з введенням добавки полікарбоксилатного суперпластифікатора Sika VC 225 приведені в Табл.8 і 9. Вплив варійованих факторів на легкоукладальність і міцність активованого МШПЦ відображені на Рис.9, 10.

Таблиця 8

Умови планування експериментів при отриманні моделей умовної легкоукладальності та міцності бетонів на активованому МШПЦ

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Натуральні	Кодовані	-1	0	+1	
1	Водоцементне відношення, (В/Ц)	X ₁	0,25	0,45	0,65	0,2
2	Вміст пластифікуючої добавки, %: Sika VC 225	X ₂	0	1,5	3	1,5
3	Водопотреба, л/м ³	X ₃	130	160	190	30

Таблиця 9

Математичні моделі показників легкоукладальності та міцності бетонів на МШПЦ

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Умовний показник* легкоукладальності	$\hat{O}\hat{E} = 4.1 + X_1 + 2X_2 + 1.1X_3 + 0.3X_1^2 + 0.35X_2^2 - 0.15X_3^2 - 0.36X_1X_2 - 0.13X_1X_3 - 0.13X_2X_3$ (10)
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа при нормальному твердінні	$f_{cm}^{28} = 31.953 - 21.844X_1 - 0.016X_1^2 - 0.016X_2^2$ (11)
Міцність при стиску після тепловологісної обробки (ТВО)** , МПа	$f_{cm}^{\hat{O}\hat{A}\hat{I}} = 26.9 - 12,5X_1 + 0.1X_1^2 + 0.01X_2^2$ (12)
Міцність при стиску після ТВО у віці 28 діб, МПа	$f_{cm}^{\hat{O}\hat{A}\hat{I}28} = 38.5 - 31.9X_1 + 0.1X_2 + 8.3X_1^2 + 1.89X_2^2 - 0.1X_1X_2$ (13)

*Умовний показник

легкоукладальності (УЛ)

0 1 2 3 4 5 6 7 8

Жорсткість, с

31-60 21-30 11-20 5-10

ОК, см

1-4 5-9 10-15 16-20 21 і більше

**– ТВО виконували при T=80° С, попередній витримці 2 год, тривалості ізотермічної витримки – 6 год, швидкості підйому та охолодження бетону 30 °/год.

При збільшенні вмісту суперпластифікатору до 0.6 % від маси цементу (3 кг/м³ бетонної суміші) як слідує з відповідних моделей водопотреба бетонної суміші знижується до 35 %. Полікарбоксилатний суперпластифікатор дозволяє отримати при нормальних умовах твердіння міцність бетону на

стиск на активованому МШПЦ у віці 7 діб близько до 40 МПа, 28 діб – більше 60 МПа. Ще більш суттєвий ефект спостерігається при застосуванні тепловолігнної обробки. При використанні добавки Sika VC 225 міцність зразків на стиск через 4 год. після пропарювання бетону при температурі 80 С° та тривалості ізотермічної витримки 6 год. досягла 45 МПа, а у віці 28 діб – 80 МПа.

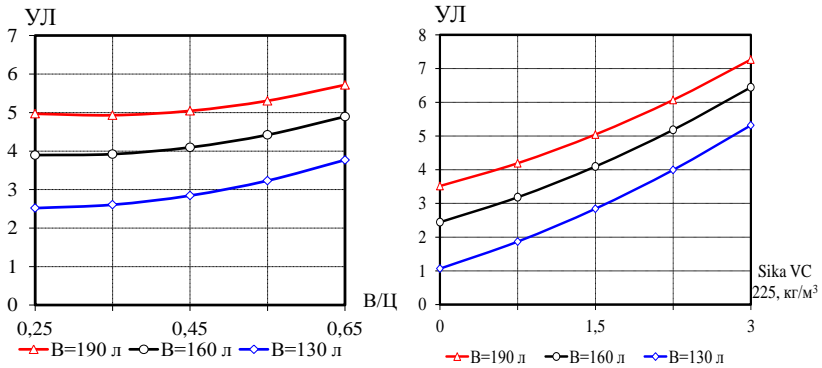


Рис. 9. Вплив варійованих факторів на умовний показник легкоукладальності при використанні в якості пластифікуючої добавки суперпластифікатора Sika VC 225

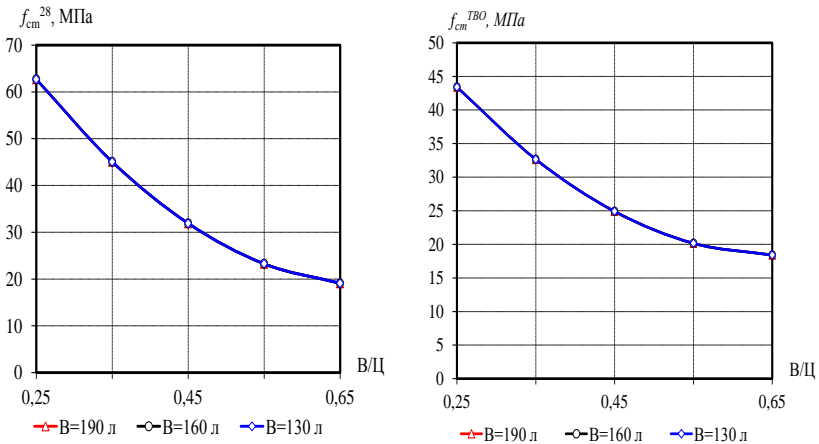


Рис.10. Вплив В/Ц на міцність бетону при використанні в якості пластифікуючої добавки суперпластифікатора Sika VC 225

Із застосуванням отриманих математичних моделей можливо здійснювати проектування складів бетону на активованому МШПЦ із заданою рухомістю бетонної суміші і міцністю бетону на стиск.

Алгоритм розрахунків полягає в знаходженні необхідного В/Ц для забезпечення заданих показників міцності при певному вмісті добавки суперпластифікатора та з врахуванням знайденого В/Ц визначенні вмісту води для отримання бетонної суміші із заданою рухомістю. За відомими формулами знаходяться питомі витрати цементу і заповнювачів.

Приклад 2. Розрахувати склад бетону класу С 45/55, на малоклінкерному шлакопортландцементі, після тепловологісної обробки для досягнення міцності при стиску 40 МПа після її проходження. Рухомість бетонної суміші рівна 10-15 см, що відповідає умовному показнику легкоукладальності 6. В якості пластифікуючої добавки використовується суперпластифікатор Sika VC 225 в кількості 3 кг/м³ ($X_2=1$).

1. Знайдемо необхідну середню міцність бетону класу С 45/55, визначену на зразках кубах з коефіцієнтом варіації 13,5 % [2].

$$f_c^{28}=55/0,778=70,7 \text{ МПа}$$

2. З рівнянь 12 та 13 (Табл.9) визначаємо В/Ц (X_1), яке забезпечить необхідну міцність бетону:

– після проходження тепловологісної обробки ($f_{cm}^{TBO} \geq 40 \text{ МПа}$):

$$X_1 = -0,85 \text{ (В/Ц=0,28)}.$$

– після проходження тепловологісної обробки у віці 28 днів ($f_{cm}^{TBO28} \geq 70,7 \text{ МПа}$):

$$X_1 = -0,74 \text{ (В/Ц=0,302)}.$$

Для забезпечення необхідних міцнісних характеристик бетону приймаємо мінімальне значення водоцементного відношення В/Ц=0,28, яке використовуємо для подальших розрахунків.

3. Для визначення водопотреби бетону рухомістю 10-15 см, яка відповідає умовному показнику легкоукладальності 6, підставляємо отримане в кодованому вигляді значення В/Ц (-0,85) та витрати суперпластифікатора Sika VC 225 ($X_2=1$) у рівняння 10.

$$X_3 = -0,48 \text{ (В=145,6 л/м}^3\text{)}.$$

4. Знаючи витрату води та водоцементне відношення, знаходимо витрату цементу:

$$Ц = \frac{В}{В/Ц} = \frac{145,6}{0,28} = 520 \text{ кг/м}^3$$

5. Витрати заповнювачів знаходимо за відомими [1, 2] рівняннями методу абсолютних об'ємів при коефіцієнті розсуву зерен $\alpha=1,44$ (насіпна густина щебеню $\rho_{нщ}=1,65 \text{ г/см}^3$, істинна густина щебеню $\rho_{щ}=2,85 \text{ г/см}^3$, істинна густина піску $\rho_{п}=2,65 \text{ г/см}^3$, розрахункове значення міжзернової пористості щебеню 0,42):

$$\Pi = \frac{1000}{\alpha \frac{v_{ш}^n}{\rho_{шц}} + \frac{1}{\rho_{ц}}} = \frac{1000}{1,44 \frac{0,42}{1,65} + \frac{1}{2,85}} = 1395 \text{ кг/м}^3;$$

$$\Pi = (1000 - (\frac{\Pi}{\rho_{ц}} + B + \frac{\Pi}{\rho_{ц}})) \rho_n = (1000 - (\frac{520}{3,1} + 145,6 + \frac{1395}{2,85})) \times 2,65 = 523 \text{ кг/м}^3.$$

Отриманий за розрахунками бетон має наступний склад: МШПЦ – 520 кг/м³; вода – 145,6 л/м³; щебінь – 1395 кг/м³; пісок – 523 кг/м³. Витрата суперпластифікатора Sika VC 225 складає 3 кг/м³.

Додаткові розрахунки можна виконати для оптимізації складів бетону за критеріями мінімізації витрати цементу або вартості бетонної суміші.

Висновки. Міцність композиційних цементів (КЦ), що включають мінеральні добавки золи-виносу і доменного гранульованого шлаку суттєво підвищується при введенні добавок суперпластифікаторів і підвищенні питомої поверхні. Завдяки збагаченню зернового складу цементу найбільш тонкими фракціями при застосуванні інтенсифікатору помелу – пропіленгліколя і зменшенні водопотреби при введенні полікарбоксилатного суперпластифікатора міцність КЦ з вмістом клінкеру 50 % при питомій поверхні 450 м²/кг досягає в 20 добовому віці марки 600, а S_{пнт} 550 м²/кг – 700 при міцності в 3-добовому віці 50 % марочної.

Отримані математичні моделі водопотреби та міцності бетону на основі КЦ з добавками суперпластифікатора і інтенсифікатора помелу дозволяють оцінити кількісний вплив вмісту добавок, питомої поверхні, водоцементного відношення і рухомості бетонних сумішей на їх водопотребу і міцність, а також розробити відповідну методику проектування їх складів.

Сульфатно-фторидна і сульфатно-фторидно-лужна активізація малоклінкерного шлакопортландцементу (МШПЦ) Сем III-C з вмістом клінкера менше 20 % дозволяє значно підвищити його міцність. Отримані математичні моделі дозволяють при вмісті портландцементного клінкера 5...19 % оцінити вплив сульфатного активізатора (фосфогіпсу), питомої поверхні, вмісту суперпластифікатора та активатора тверднення Na₂SiF₆ на міцність цементу. Показана можливість додаткового підвищення активності МШПЦ із введенням добавки вапна.

Отримані математичні моделі міцності бетонів на активованому малоклінкерному шлакопортландцементі та легкоукладальності бетонної суміші дозволили розробити методику проектування їх складів.

1. Баженов Ю.М. Технология бетона. М.: Изд-во АСВ. 2002. 500 с.
2. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства. К.: "Основа". 2007. 613 с.
3. Pu Xincheng. Super-High-Strength High Performance Concrete. CRC Press. 2012. 276 p.
4. G.B. Kodeboyina. High Performance Self Consolidating Cementitious Composites. CRC Press. 2018. 433 p.

5. M.A. Caldarone. High-Strength Concrete: A Practical Guide. CRC Press. 2008. 272 p.
6. M.B. Peterman, R.L. Carrasquilo. Production of High strength concrete. Noyes Publications. 1986. 278 p.
7. Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ. 2006. 368 с.
8. V. Kalashnikov, O. Tarakanov, Yu. Kusnetsov, V. Volodin, E. Belyakov. Next generation concrete on the basis of fine grained dry powder mixes. Magazine of Civil Engineering. Issue 8(34). 2012. 109 p.
9. В.И. Калашников, Д.М. Валиев, Е.В. Гудева, В.М. Володин. Высокопрочные порошково-активированные пропариваемые бетоны нового поколения // Из-во высших учебных заведений. № 5. 2011. С. 14-19.
10. Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой, С.М. Чудновский. Цементные бетоны с минеральными наполнителями [Cement Concrete with Mineral Fillers]. К.: Будивельник, 1991. 136 с.
11. Л.Б. Сватовская, М.М. Сычев. Активированное твердение цементов. Л.: Стройиздат. 1983. 160 с.
12. Д. Гиббс. Термодинамические работы. М.: Гостехиздат. 1950. 492 с.
13. Э.Р. Пинус. Контактные слои цементного камня в бетоне и их значение // Структура, прочность и деформация бетона. М.: Стройиздат. 1966. С. 290-294.
14. В.Г. Батраков. Модифицированные бетоны. Теория и практика. М.: Стройиздат. 1998. 768 с.
15. Л.И. Дворкин, О.Л. Дворкин, Ю.В. Гарницький, І.В. Чорна, В.В. Марчук. Високоміцні бетоны на цементах низької водопотреби з використанням пиловидних відходів промисловості // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. Вип.43. Київ. 2012. С. 73-81.
16. R. Siddique. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties // Resources, Conservation and Recycling. Vol 55. Issue 11. 2011. Pp. 921-932.
17. K.G. Babu, P.V. Surya Prakash. Efficiency of silica fume in concrete // Cement and Concrete Research. Vol 25. Issue 6. 1995. Pp. 1273-1283.
18. T. Gonen, S. Vazicioglu. The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of Concrete // Building and Environment. Vol 42. Issue 8. 2007. Pp. 3080-3085.
19. L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Y. Ribakov. Construction materials Based on Industrial Waste Products. Nova Science Publishers. 2016. 242 p.
20. N. Spiratos, M. Page, N. Mailvaganam, V. Malhotra, C. Jolicoeur. Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology and Practice. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. 2017. 322p.
21. F.W. Locher. Cement. Principle of production and use. Verlag Bau + Technic. 2006. 534 p.
22. L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Y. Ribakov. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers. 2012. 166 p.
23. N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov. A review on alkali-activated slag cements incorporated with supplementary materials // Journal of Sustainable Cement Based Materials. Vol 3. Issue 1. 2014. Pp. 61-74.
24. П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницкий, И.И. Руденко. Щелочные цементы. К.: "Основа". 2015. 448 с.
1. Bazhenov Yu.M. Tekhnologiya betona. M.: Izd-vo ASV. 2002. 500 s.
2. Dvorkin L.Y. Osnovi betonoznavstva. K.: "Osnova". 2007. 613 s.
3. Pu Xincheng. Super-High-Strength High Performance Concrete. CRC Press. 2012. 276 p.

4. G.B. Kodeboyina. High Performance Self Consolidating Cementitious Composites. CRC Press. 2018. 433 p.
5. M.A. Caldarone. High-Strength Concrete: A Practical Guide. CRC Press. 2008. 272 p.
6. M.B. Peterman, R.L. Carrasquillo. Production of High strength concrete. Noyes Publications. 1986. 278 p.
7. Yu.M. Bazhenov, V.S. Demyanova, V.I. Kalashnikov. Modifitsirovannyye vysokokachestvennyye betony. M.: ASV. 2006. 368 s.
8. V. Kalashnikov, O. Tarakanov, Yu. Kusnetsov, V. Volodin, E. Belyakov. Next generation concrete on the basis of fine grained dry powder mixes. Magazine of Civil Engineering. Issue 8(34). 2012. 109 p.
9. V.I. Kalashnikov, D.M. Valiyev, Ye.V. Gutseva, V.M. Volodin. Vysokoprochnyye poroshkovo-aktivirovannyye preparivayemye betony novogo pokoleniya // Iz-vo vysshikh uchebnykh zavedeniy. № 5. 2011. S. 14-19.
10. L.I. Dvorkin, V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy, S.M. Chudnovskiy. Tsementnyye betony s mineralnymi napolnitelyami [Cement Concrete with Mineral Fillers]. K.: Budivelnik, 1991. 136 s.
11. L.B. Svatovskaya, M.M. Sychev. Aktivirovannoye tverdeniye tsementov. L.: Stroyizdat. 1983. 160 s.
12. D. Gibbs. Termodinamicheskiye raboty. M.: Gostekhizdat. 1950. 492 s.
13. E.R. Pinus. Kontaknyye sloi tsementnogo kamnya v betone i ikh znacheniye // Struktura, prochnost i deformatsiya betona. M.: Stroyizdat. 1966. S. 290-294.
14. V.G. Batrakov. Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika. M.: Stroyizdat. 1998. 768 s.
15. L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Yu.V. Garnitskiy, I.V. Chorna, V.V. Marchuk. Visokomitsni betoni na tsementakh nizkoї vodopotrebi z vikoristannyam pilovidnikh vidkhodiv promislivosti // Budivelni materialy, virobi ta sanitarna tekhnika. Vip.43. Kiiv. 2012. S. 73-81.
16. R. Siddique. Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties // Resources, Conservation and Recycling. Vol 55. Issue 11. 2011. Pp. 921-932.
17. K.G. Babu, P.V. Surya Prakash. Efficiency of silica fume in concrete // Cement and Concrete Research. Vol 25. Issue 6. 1995. Pp. 1273-1283.
18. T. Gonen, S. Vazicioglu. The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of Concrete // Building and Environment. Vol 42. Issue 8. 2007. Pp. 3080-3085.
19. L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Y. Ribakov. Construction materials Based on Industrial Waste Products. Nova Science Publishers. 2016. 242 p.
20. N. Spiratos, M. Page, N. Mailvaganam, V. Malhotra, C. Jolicoeur. Superplasticizers for Concrete: Fundamentals, Technology and Practice. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. 2017. 322p.
21. F.W. Locher. Cement. Principle of production and use. Verlag Bau + Technic. 2006. 534 p.
22. L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin, Y. Ribakov. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers. 2012. 166 p.
23. N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov. A review on alkali-activated slag cements incorporated with supplementary materials // Journal of Sustainable Cement Based Materials. Vol 3. Issue 1. 2014. Pp. 61-74.
24. P.V. Krivenko, R.F. Runova, M.A. Sanitskiy, I.I. Rudenko. Shchelochnyye tsementy. K.: "Osnova". 2015. 448 s.

ДІАГРАМИ ДЕФОРМУВАННЯ БЕТОНІВ НОВОГО ПОКОЛІННЯ НА РОЗТЯГ ПРИ ЗГІНІ ТА ЇХНІ МЕХАНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ

CONCRETE DEFORMATION DIAGRAMS OF THE NEW GENERATION TENSILE BENDING AND THEIR MECHANICAL CHARACTERISTICS

Бабич Є.М., д.т.н., проф., ORCID ID: 0000-0003-1746-999, **Кочкар'єв Д.В., д.т.н., доц.,** ORCID ID: 0000-0002-4525-7315, **Безусяк О.В., к.т.н., доц.,** ORCID ID: 0000-0003-0662-9769, к.т.н., доц., **Філіпчук С.Ф., к.т.н., доц.,** ORCID ID: 0000-0002-4464-4620 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Babich E.M., Dr., professor, ORCID ID: 0000-0003-1746-99, **Kochkarev D.V., Dr.,** associate professor, ORCID ID: 0000-0002-4525-7315, **Bezussyak O. V.,** candidate of technical sciences, associate professor, ORCID ID: 0000-0003-0662-9769, **Filipchuk S. F.,** candidate of technical sciences, associate professor, ORCID ID: 0000-0002-4464-4620 (National University of Water Management and Nature Resources Use, Rivne)

Наведені результати експериментальних досліджень стандартних зразків із бетонів нового покоління при дії статичних навантажень, які підтвердили наявність підвищених механічних характеристик на розтяг при згині реакційно порошкових бетонів із сітчастим армуванням порівняно з іншими видами бетонів у тому числі і фібробетонів.

Розглянута методика випробування зразків із бетонів нового покоління на розтяг при згині. На основі виконаних експериментальних досліджень отримані діаграми деформування бетонів на розтяг при згині, встановлена їх міцність на центральний розтяг та остаточна міцність на розтяг при згині, наведені механічні характеристики досліджених бетонів.

Experimental investigations of new generation concrete for tensile bending are considered. In general, standard specimens of the following types were subject to the study: fine-grained concrete; reactive powder concrete; fine-grained fiber concrete; reactive powder fiber concrete; Reactive Reinforced Concrete (3 grids); Reactive Reinforced Concrete (5 grids); Reactive Reinforced Concrete (10 grids); reinforced reactive powder fiber concrete (5 meshes). Methods of experimental research included testing for bending of beams and prisms with simultaneous fixation of load and deflections. When testing the prisms, an incision was made at the point of maximum torque.

Prism sizes are accepted $150 \times 150 \times 550$ (600). When testing the reactive powder concretes with mesh reinforcement, the tests were performed on beams. The beams were taken in dimensions of $40 \times 90 \times 160$, without cuts. The specimens were tested using a beam pattern with one single center force applied. Testing of fiber concrete specimens shall generally be carried out to achieve a displacement value of not more than 4 mm or directly to the destruction of the specimens, whichever is the earlier. At the same time for fiber concrete with values of displacements equal to or greater than 4 mm there was a significant drop in residual tensile strength. On the other hand, no fall was observed for specimens of reactive powder, even at values of 4 mm or more. Therefore, in the experiments, the deformation diagrams were constructed over the entire range. After the tests, a statistical analysis of the results of the experiment was conducted and the basic strength parameters of different concretes were obtained. Conducted experimental studies on obtaining bending tensile deformation diagrams showed increased tensile strength of standard specimens of reactive powder concrete in comparison with other types of concrete including fiber concrete. In this case, the largest values of the areas of the deformation diagrams also corresponded to the reactive powder concretes, which corresponds to a significant reserve of energy resource when exposed to dynamic influences.

Ключові слова: реакційно-порошковий бетон, високоміцний бетон, фіробетон, діаграми деформування бетону, остаточної міцності бетону на розтяг, механічні характеристики.

Reaction-powder concrete, high-strength concrete, fiber concrete, concrete deformation diagrams, ultimate tensile strength of concrete, mechanical characteristics.

Вступ. Об'ємно-планувальні рішення сучасних будівель та споруд передбачають використання великих прольотів несучих згинальних елементів, зокрема балок та плит. В свою чергу це призводить до необхідності використання значних розмірів таких конструкцій. Одним із способів зменшення їх розмірів є використання бетонів нового покоління – високоміцних фіробетонів та реакційно-порошкових бетонів. Такі бетони характеризуються високими значеннями співвідношень між міцністю на стиск та розтяг. Тому виконання експериментальних досліджень по встановленню міцності на розтяг при згині бетонів нового покоління є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження високоміцних фіробетонів [1, 2, 3, 4] та реакційно порошкових бетонів із сітчастим армуванням [5, 6, 7] свідчать про необхідність розробки спеціальної методики випробування зразків із таких матеріалів. Ці бетони, на відміну від традиційних,

характеризуються значною роботою розтягнутого бетону в несучих елементах безпосередньо до їх руйнування, яка суттєво впливає на їх напружено-деформований стан. Для них необхідно поряд із міцністю на розтяг при згині додатково визначати остаточну міцність на розтяг при згині за різних значень відносних деформацій. У загальному необхідно отримати діаграму деформування розтягу при згині для таких бетонів. Вона залежить від багатьох факторів: складу бетону, виду фібри або сітчастого армування, міцнісних характеристик фібри та сітчастого армування тощо. Переважна більшість дослідників вказують на значні переваги таких бетонів у порівнянні з традиційними, тому для підтвердження таких даних необхідно виконати відповідні експериментальні дослідження.

Постановка мети та задач досліджень. Експериментально отримати діаграми деформування високоміцних бетонів, фіробетонів та реакційно-порошкових бетонів на розтяг при згині, а також дати порівняльну характеристику отриманим діаграмам та встановити їх механічні характеристики.

Методика досліджень. Для отримання діаграм деформування бетону розтягання використані методики, наведені в роботах [8, 9, 10, 11]. Прийнята методика передбачає випробування на згин балочок або призм із одночасною фіксацією навантаження та прогинів (або ширини розкриття тріщин). При випробуванні призм рекомендується влаштовувати надрізи у місці дії максимального значення моментів. Розміри призм прийняті 150×150×550 мм. При випробуванні реакційно-порошкових бетонів із сітчастим армуванням виготовлення призм із такими розмірами доволі ускладнено. Тому випробування виконувались на балочках. Балочки виготовлялися розмірами 40×90×160 мм без надрізів, але в процесі навантаження за надріз вважалася перша утворена тріщина в перерізі.

Загально відомо, що випробування фіробетонних зразків проводиться до досягнення значень переміщень не більше 4 мм або безпосередньо до руйнування зразків, залежно від того що відбудеться раніше. При цьому для фіробетону при значеннях переміщень, рівних або більших 4 мм, відбувається значне падіння залишкової міцності при розтязі. Натомість, для зразків із реакційно-порошкового бетону, навіть при значеннях переміщень 4 мм та більше такого падіння не спостерігається. Тому в експерименті графіки будувалися на всьому діапазоні – безпосередньо до руйнування.

Під час випробування тріщини утворювались лише у місці надрізу. Якщо надріз був відсутній то у місці дії максимального згинаючого моменту – по середині зразка. Результати випробувань у яких було зафіксовані тріщини не по середині відбраковувались. Процес випробування балочок на згин представлений на рис.1.

Випробування проходило на механічному 10-ти тонному пресі, що давало можливість отримати прогини при сталому деформуванні. Прогини визначалися індикатором годинникового типу з точністю 0,001 мм.

Загалом були випробувані наступні зразки із таких видів бетону:

- дрібнозернистий бетон;
- реакційно порошоквий бетон;
- дрібнозернистий фібробетон;
- реакційно порошоквий фібробетон;
- армований реакційно порошоквий бетон (3 сітки);
- армований реакційно порошоквий бетон (5 сіток);
- армований реакційно порошоквий бетон (10 сіток);
- армований реакційно порошоквий фібробетон (5 сіток);



Рис.1. Експериментальне отримання діаграм деформування бетону на балочках

Результати досліджень. Для отримання достовірних результатів експериментальних досліджень було випробувано 6 зразків близнюків у кожній із запланованих партій. Експериментальні графіки залежності прогинів від навантаження для дослідних зразків представлені на рис. 2.

В результаті проведення досліджень були побудовані графіки залежності "навантаження прогин". Внаслідок того, що під час дослідів вимірювалися прогини експериментальних зразків, переміщення зовнішніх граней надрізів a_F визначалися за виразом [8, 9, 10, 11]

$$a_F = 0,85 \times f + 0,04. \quad (1)$$

Коригування даного параметру непотрібно так як прогини визначалися по нижній грані зразків. Для кожного зразка визначалося значення міцності f_{ult} , $f_{0,5}$, $f_{2,5}$ за відповідними виразами:

$$f_{ult} = \frac{3 F_{ult} \cdot l}{2 b \cdot h_{sp}^2}; \quad (2)$$

$$f_{0,5} = \frac{3 F_{0,5} \cdot l}{2 b \cdot h_{sp}^2}; \quad (3)$$

$$f_{2,5} = \frac{3 F_{2,5} \cdot l}{2 b \cdot h_{sp}^2}. \quad (4)$$

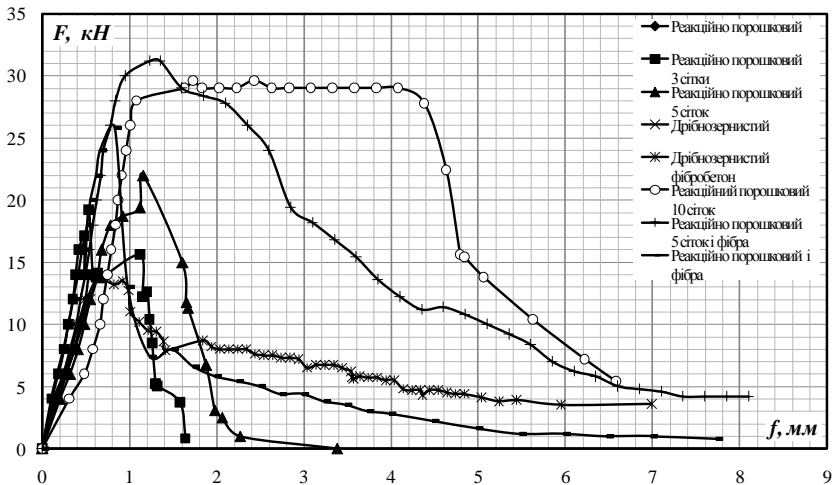


Рис.2. Експериментальні залежності "навантаження–прогин" випробуваних зразків

У виразах (2), (3), (4):

F_{ult} – максимальне значення навантаження; $F_{0,5}$, $F_{2,5}$ – значення навантаження, яке відповідає переміщенню зовнішніх граней при $a_{F0,5} = 0,5$ і $a_{F2,5} = 2,5$ і, відповідно; l – розрахунковий проліт; h_{sp} – відстань між вершиною надрізу і верхньою гранню зразка.

Характеристичні значення міцності зразків на розтяг при згині визначалося за відповідними формулами:

$$f_{t,n} = f_{t,m} (1 - 1,64 \cdot v_{t,m}); \quad (5)$$

$$f_{t2,n} = f_{t2,m} (1 - 1,64 \cdot v_{t2,m}); \quad (6)$$

$$f_{t3,n} = f_{t3,m} (1 - 1,64 \cdot v_{t3,m}); \quad (7)$$

У формулах (5), (6), (7): $f_{t,m}$, $f_{t2,m}$, $f_{t3,m}$ – відповідні середні значення міцності на розтяг при згині; $v_{t,m}$, $v_{t2,m}$, $v_{t3,m}$ – коефіцієнти варіації значень міцності на розтяг при згині, які визначаються за таким виразами:

$$v_{t,m} = \frac{S_{F_{ult}}}{f_{t,m}}; \quad (8)$$

$$v_{t2,m} = \frac{S_{F_{0,5}}}{f_{t2,m}}; \quad (9)$$

$$v_{t3,m} = \frac{S_{F_{2,5}}}{f_{t3,m}}. \quad (10)$$

Середні квадратичні відхилення, які входять у вирази (8), (9), (10) визначалися за формулами:

$$S_{F_{ult}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{t,i} - f_{t,m})^2}{n-1}}; \quad (11)$$

$$S_{F_{0,5}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{t2,i} - f_{t2,m})^2}{n-1}}; \quad (12)$$

$$S_{F_{2,5}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (f_{t3,i} - f_{t3,m})^2}{n-1}}. \quad (13)$$

У формулах (11), (12), (13) n – кількість зразків.

Середня міцність на розтяг при згині досліджених зразків представлена у табл. 1.

Таблиця 1

Середня міцність експериментальних зразків на розтяг при згині

№п/п	Характеристики експериментальних зразків	$f_{t,m}, \text{МПа}$
1	Дрібнозернистий бетон	12.5
2	Реакційно порошоквий бетон	14.6
3	Дрібнозернистий фібробетон	14.6
4	Реакційно порошоквий фібробетон	26.9
5	Армований реакційно порошоквий бетон (3 сітки)	20.0
6	Армований реакційно порошоквий бетон (5 сіток)	22.9
7	Армований реакційно порошоквий бетон (10 сіток)	30.8
8	Армований реакційно порошоквий фібробетон (5 сіток)	32.5

Графіки залежності переміщення зовнішніх граней надрізів a_F від міцності f_t представлені на рис. 3.

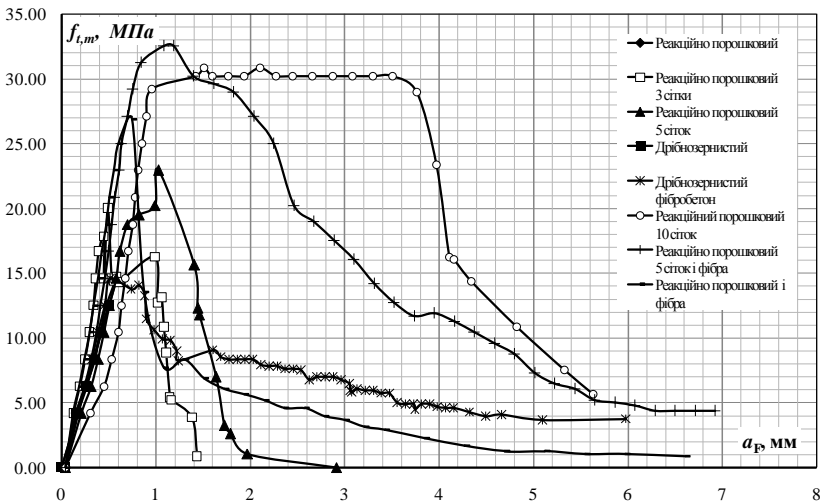


Рис.3. Експериментальні залежності переміщення зовнішніх граней надрізів a_F від міцності випробуваних зразків

Середня міцність на розтяг при згині досліджених зразків представлена у табл. 1. У табл. 2 наведені коефіцієнти варіації для досліджуваних експериментальних зразків.

Таблиця 2

Коефіцієнти варіації експериментальних зразків при визначенні міцності на розтяг при згині

№ п/п	Характеристики експериментальних зразків	Коефіцієнти варіації, %		
		$V_{t,m}$	$V_{t2,m}$	$V_{t3,m}$
1	Дрібнозернистий бетон	10.3	11.2	9.8
2	Реакційно порошковий бетон	7.2	11.3	8.1
3	Дрібнозернистий фібробетон	8.1	8.8	10.1
4	Реакційно порошковий фібробетон	8.6	8.9	11.3
5	Армований реакційно порошковий бетон (3 сітки)	9.4	10.1	10.4
6	Армований реакційно порошковий бетон (5 сіток)	8.7	8.9	9.8
7	Армований реакційно порошковий бетон (10 сіток)	8.1	10.3	11.2
8	Армований реакційно порошковий фібробетон (5 сіток)	9.5	10.1	12.1

Характеристична міцність експериментальних зразків на розтяг при згині представлена у табл. 3. Характеристичний опір бетонів на осьовий розтяг визначали за виразом (табл. 4).

$$f_{ft,n} = 0,56 \cdot f_{t,n}. \quad (14)$$

Як видно з результатів досліджень найбільші значення залишкової міцності має реакційно порошковий бетон, армований 10-ма сітками. Значення остаточної міцності у такому випадку практично відповідає максимальному. Такі особливості роботи на розтяг при згині дають підвищені характеристики деформативності згинальних елементів, що повинно значно покращувати роботу елементів при дії динамічних навантажень.

Суттєве значення для конструктивного розрахунку має аналітичний опис отриманих діаграм деформування [12]. Як видно з представлених експериментальних графіків описати дані графіки нелінійними залежностями доволі складно. Переважна більшість дослідників рекомендує використовувати кусочно-лінійні залежності для опису роботи розтягнутого бетону. В окремих випадках можна використовувати поліноміальні або дробово-раціональні залежності. При визначенні міцності перерізів також доцільним буде використовувати коефіцієнти повноти епюр.

Таблиця 3

Характеристична міцність зразків на розтяг при згині

№ п/п	Характеристики експериментальних зразків	Характеристична міцність зразків на розтяг при згині		
		$f_{t,n}$	$f_{t2,n}$	$f_{t3,n}$
		МПа		
1	Дрібнозернистий бетон	10.4	-	-
2	Реакційно порошковий бетон	12.9	-	-
3	Дрібнозернистий фібробетон	12.7	12.5	6.3
4	Реакційно порошковий фібробетон	23.1	17.8	3.7
5	Армований реакційно порошковий бетон (3 сітки)	16.9	12.2	-
6	Армований реакційно порошковий бетон (5 сіток)	19.63	10.7	0.8
7	Армований реакційно порошковий бетон (10 сіток)	26.7	25.1	24.7
8	Армований реакційно порошковий фібробетон (5 сіток)	27.4	18.4	16.2

Таблиця 4

Характеристична міцність експериментальних зразків
на центральний розтяг

№ п/п	Характеристики експериментальних зразків	Характеристична міцність зразків на центральный розтяг $f_{ft,n}$, МПа
1	Дрібнозернистий бетон	5.8
2	Реакційно порошковий бетон	7.2
3	Дрібнозернистий фібробетон	7.1
4	Реакційно порошковий фібробетон	12.9
5	Армований реакційно порошковий бетон (3 сітки)	9.5
6	Армований реакційно порошковий бетон (5 сіток)	11.0
7	Армований реакційно порошковий бетон (10 сіток)	15.0
8	Армований реакційно порошковий фібробетон (5 сіток)	15.4

Висновки. 1. Розроблена методика експериментального отримання діаграм деформування на розтяг при згині бетонів нового покоління, у тому числі і реакційно-порошкових із сітчастим армуванням.

2. Виконані експериментальні дослідження по отриманню діаграм деформування на розтяг при згині показали підвищені характеристики міцності на розтяг стандартних зразків із реакційно порошкового бетону у порівнянні із іншими видами бетонів у тому числі і фібробетонів. При цьому найбільші значення площ діаграм деформування відповідають також реакційно порошковим бетонам, що відповідає значному запасу енергетичного ресурсу при дії на них динамічних впливів.

3. Встановлені характеристичні значення міцності досліджених бетонів на центральний розтяг та розтяг при згині.

1. Collepari, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC / M. Collepari // Proc. of the Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering. – Milan, 2003. – P. 1–8.

2. Дыкин И.В. Основные принципы оптимизации дисперсно-гранулометрического состава порошково-активированных бетонов нового поколения / Строительство – формирование среды жизнедеятельности, 2015, с.834-837.

3. Wang S., Zhang M., Quek T. Compressive behavior of plain and fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain rate loading // Applied Mechanics and Materials Vol. 82 (2011). P. 57-62.

4. Калашников, В.И. Через рациональную реологию – в будущее бетонов. Ч. 2. Тонкодисперсные реологические матрицы и порошковые бетоны нового поколения / В.И. Калашников // Технологии бетонов. 2007. No 6. С. 8-11.

5. Сунак О.П. Сталефібробетонні конструкції / О.П. Сунак // Навч. посібн. – Луцьк: Media, 1999. – 158 с.

6. Бабич С.М. Проектування та виготовлення безпапірних труб із сталефібробетону / Є.М. Бабич, О.В. Андрійчук // Рекомендації. – Луцьк: Луцький НТУ, 2012. – 32 с.

7. Талантова К.В. Строительные конструкции с заданными свойствами на основе сталефибробетона: Дис... докт. техн. наук: 05.23.01 – Барнаул., 2009. – 476 с.

8. EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fiber concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).

9. EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete. Effect on concrete.

10. СП Конструкции и изделия фибробетонные. Правила проектирования. Москва. – 2012. – 155 с.

11. СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ Москва. – 2012. – 117 с.

12. ДБН В.2.6–98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.

1. Collepari, M. Innovative Concretes for Civil Engineering Structures: SCC, HPC and RPC / M. Collepari // Proc. of the Workshop on New Technologies and Materials in Civil Engineering. – Milan, 2003. – P. 1–8.

2. Dykin I.V. Osnovnjie principji optimisacii dispersno-granulometricheskogo sostava poroshkovo-aktivirovannjih betonov novogo pokolenija [Basic principles of optimization of

- dispersion-particle size composition of powder-activated concretes of a new generation] / Stroitelstvo – formirovanie sredji zhisnedejatelnosti, 2015, p.834-837.
- 3.** Wang S., Zhang M., Quek T. Compressive behavior of plain and fiber-reinforced high-strength concrete subjected to high strain rate loading // Applied Mechanics and Materials Vol. 82 (2011). P. 57-62.
- 4.** Kalashnikov, V.I. Cherez ratsional'nyu reologiyu -v budushcheye betonov. CH. 2. tonkodispersnyye reologicheskiye matritsy i poroshkovyye betony novogo pokoleniya / V.I. Kalashnikov // Tekhnologii betonov. 2007. No 6. P. 8-11.
- 5.** Sunak A.P. Stalefibrobetonnykh konstruksii / A.P. Sunak // Ucheb. posibn. - Lutsk: Media, 1999. - 158 p.
- 6.** Babich Ye.M. Proyektirovaniye i izgotovleniye beznapornykh trub s stalefibrobetona / Ye.M. Babich, O. Andreychuk // Rekomendatsii. - Lutsk: Lutskiy NTU, 2012. - 32 p.
- 7.** Talantov K.V. Stroitel'nyye konstruksii s zadannym svoystvami na osnove stalefibrobetona: Dis ... dokt. tekhn.nauk: 05.23.01 - Barnaul., 2009. - 476 p.
- 8.** EN 14651:2005+A1:2007 Test method for metallic fiber concrete. Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual).
- 9.** EN 14845-2:2006 Test methods for fibers in concrete. Effect on concrete.
- 10.** SP Konstruksii i izdeliya fibrobetonnyye. Pravila proyektirovaniya. Moskva. - 2012. - 155 p.
- 11.** STO Nostromo 2.27.125-2013. Konstruksii transportnykh tonneley iz fibrobetona. Pravila proyektirovaniya i proizvodstva rabot Moskva. - 2012. - 117 p.
- 12.** DBN V.2.6-98: 2009. Konstruksii zdaniy i sooruzheniy. Betonnyye i zhelezobetonnyye konstruksii. Osnovnyye polozheniya. - M.: Minregionstroy Ukrainy, 2011. - 71 p.

УДК 691.545: 666.95

ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОЇ ДОБАВКИ СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРУ ТА МЕТАКАОЛІНУ НА УСАДКОВІ ДЕФОРМАЦІЇ ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ

INFLUENCE OF COMPOSITE ADMIXTURE OF SUPERPLASTICIZER AND METAKAOLIN ON SHRINKAGE OF HARDENED CEMENT PASTE

Безусяк О.В., канд. техн. наук, доц., **Лушнікова Н.В.**, канд. техн. наук, доц. (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Bezusyak O.V., Assoc. Prof., **D.Eng.**, **Lushnikova N.V.**, Assoc. Prof., **D.Eng.** (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

В статті представлено результати визначення сумісного впливу комплексної добавки суперпластифікатора та метакАОліну на усадкові деформації цементного каменю. Такі комплексні добавки активно використовуються як компонент високофункціональних бетонів, бетонів з самоущільнюваних сумішей та архітектурного бетону.

The article covers results of determination of mutual influence of superplasticizer (SP) and metakaolin (MTK) on shrinkage of hardened cement paste. These parameters have significant effect on durability and mechanical properties of concrete. There was investigated the influence of type of superplasticizer and specific surface of metakaolin on the drying shrinkage of hardened cement paste specimens. The increase of SP dosage at constant MTK content and water binder ratio leads to linear increasing of drying shrinkage. There is no strict correlation between specific surface of metakaolin and drying shrinkage. The raise of SP above the recommended dosage leads to setting hardening retarding with subsequent intensification of shrinkage. It was determined, that optimum content of MTK from the point of minimization drying shrinkage is about 10%. Such types of modified cement binders model the binder in high-performance concrete and can be applied for manufacturing self-compacting architectural concrete mixtures due to high aesthetical properties of metakaolin.

Ключові слова: суперпластифікатор, метакАОлін, цементний камінь, усадка, архітектурний бетон, бетон з сумішей, що самоущільнюються, високофункціональний бетон.

Superplasticizer, metakaolin, hardened cement paste, shrinkage, architectural

concrete, self-compacting concrete, high-performance concrete.

Вступ. Отримання високофункціональних бетонів [1] та бетонів на основі самоущільнюваних сумішей [2] можливе лише завдяки використанню добавок поліфункціональної дії, що містять високоефективні розріджувачі та активні мінеральні добавки. За умов високого вмісту в'язучого та високої водопотреби активних мінеральних добавок, що використовуються для бетону цих видів, актуальним є питання усадкових деформацій. Усадкові деформації бетону є однією з основних причин руйнування бетонних та залізобетонних конструкцій [3,4]. Як свідчать результати досліджень усадки високофункціональних бетонів, вплив водоцементного відношення в межах 0,35-0,5 є відносно незначним. Натомість об'єм цементного тіста має суттєвий вплив [1].

Комплексні модифікатори на основі суперпластифікаторів та мінеральних добавок дозволяють знизити водопотребу бетонних сумішей, витрату цементу, таким чином зменшивши загальний об'єм цементного каменю [5,6]. Попередні дослідження, результати яких висвітлено в статтях [7-9], описують особливості гідратації цементних паст та структуроутворення цементного каменю при використанні комплексу добавок складу «суперпластифікатор-метакаолін».

Метою даної статті є вивчення впливу суперпластифікатора та мінеральної добавки на усадкові деформації цементного каменю. У якості основної мінеральної добавки використано метакаолін – високореактивний продукт випалу каоліну в інтервалі температур 650...750⁰С.

Загальні уявлення про усадкові деформації цементного каменю

Пластичні усадкові деформації розвиваються в цементному камені і бетоні в протягом перших годин під час вкладання до закінчення тужавлення та можуть призводити до тріщиноутворення бетонних і залізобетонних конструкціях. Усадкові деформації, що розвиваються під час твердіння бетону є суттєвішими порівняно із пластичною усадкою. Основною причиною усадкових деформацій є висихання, в меншій мірі контракційна (аутогенна) усадка, зумовлена хімічною контракцією при формуванні новоутворень [10].

Згідно даних [1,2,12], основними факторами, що впливають на усадку цементного каменю є водоцементне відношення, тип та мінералогічний склад цементу, вміст гіпсу у в'язучому, умови тверднення (температура, вологість), вид і дозування органічних та мінеральних добавок, розміри зразків. При цьому усадка бетону залежить від вмісту цементного каменю, виду заповнювачів.

За О.Є. Шейкіним та ін. [11], при висиханні цементного каменю насамперед видаляється капілярно-зв'язана волога, після чого випаровується волога, адсорбована на поверхні кристалів. Потім видаляється волога, яка знаходиться між шарами кристалів гідросилікатів кальцію з тоберморитового гелю. Також можлива часткова втрата хімічно зв'язаної води. Початкова усадка цементного каменю при високій відносній вологості спричинена капілярними силами. Чим меншою є відносна вологість повітря, тим меншим є радіус капілярів.

Дослідження впливу добавки метакаоліну (МТК) на контракційну усадку цементного каменю при збереженні сталого водов'язучого відношення, проведені S. Wild та J. M. Khatib свідчать про те, що усадкові деформації збільшуються при дозуванні МТК до 10% маси цементу, а для композицій з додаванням більше 15% усадкові деформації зменшуються [12].

Дослідження усадки при висиханні цементних паст з добавкою метакаоліну до 15%, витриманих 3 та 28 діб у воді і надалі при вологості 20% і 55% продемонстрували, що введення МТК незначно збільшує усадкові деформації при висиханні в ранньому віці до 3 діб та призводить до зменшення усадкових деформацій у віці до 28 діб. Зменшення усадки при введенні МТК зумовлено сповільненням та загальним зменшенням випарування води в цементному камені, в якому, формується низькопориста структура з порами меншого діаметру, завдяки ефекту наповнювача МТК та його пуццолановим реакціям [13].

Згідно даних [14] основними продуктами пуццоланових реакцій МТК є низькоосновні гідросилікати кальцію (C-S-H) and гідрогеленіт (C₂ASH₈). При цьому збільшення частки метакаоліну у в'язучому призводить до зменшення контракційної усадки паст при водов'язучому відношенні 0,3.

Причиною аутогенної усадки високофункціональних бетонів з В/Ц<0,4 вважають брак надлишкової води для випарування та формування капілярних пор [15]. Згідно досліджень M. Collepardi et al. [16], важливим фактором, що впливає на її визначення, є покриття поверхні зразків непроникним шаром, при цьому контракція новоутворень залежить від температури та відносної вологості повітря після завершення пластичних деформацій та протягом перших тижнів тверднення. При цьому у випадку бетонів на основі сумішей, що самоущільнюються, при однаковому В/Ц і водовмісті додавання мінеральних добавок до суперпластифікованих бетонів призводить до зменшення усадкових деформацій при висиханні за температури 20⁰С та відносної вологості 65-70%.

Більшість досліджень доводять позитивний вплив МТК на зменшення усадкових деформацій при висиханні так само як і контракційної усадки [17-19].

Математичні моделі оцінки та прогнозування усадкових деформацій

Важливим аспектом вивчення усадкових деформацій є встановлення розрахункових залежностей для їх оцінювання. Формули для прогнозування усадки при висиханні найчастіше враховують вплив В/Ц [2]. Проте відзначається, що для віброваного бетону вона може бути однаковою, втім слід враховувати водо-в'яжуче відношення, оскільки застосовуються мінеральні добавки. Вважається також, що розрахунок за моделлю СЕВ-FIB дає занижені значення усадки порівняно з експериментальними, а за моделлю АСІ – завищені [20]. Існуючі формули переважно пропонують оцінку граничних усадкових деформацій [21, с.360], можливий також розрахунок значень усадки цементного каменю та бетону в певному віці [1, с.134]. При цьому не враховуються особливості вихідних матеріалів, вміст хімічних та мінеральних добавок. Водночас математичний опис кінетики усадкових деформацій суттєво ускладнений [20, с.334].

Матеріали і методи досліджень

У якості **вихідних матеріалів** застосовувалися: портландцемент ПЦ І-500, хімічний склад якого наведено в табл. 1, а властивості - в табл. 2, метакаолін вітчизняного виробництва, виготовлений на основі каоліну Глухівецького родовища (Вінницька обл.) та три види суперпластифікаторів.

Таблиця 1

Хімічно-мінералогічний склад портландцементу

CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	MgO	Cl	H ₂
67,15	21,70	5,36	4,10	-	0,74	-	0,28
ВПП	КН	n	p	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
0,34	0,94	2,34	1,31	65,17	13,06	7,26	12,46

Таблиця 2

Фізично-механічні властивості портландцементу

Тонкість помелу, залишок на ситі №008, %	Питома поверхня за Блейном, м ² /кг	Нормальна густина цементного тіста, %	Строки тужавлення		Рівномірність зміни об'єму
			початок	кінець	
5	330	24,0	1 год 35 хв	3 год 45 хв	витримує
Міцність при згині, МПа		Міцність при стиску, МПа		Вміст добавок	
2 доби	28 діб	2 доби	28 діб	гіпсу, %	
5,65	8,75	23,70	54,00	3,5	

Вміст Al₂O₃ в усіх пробах метакаоліну в межах 42–43%, вміст SiO₂ – в межах 52,5–54,5%, ВПП – 0,48–0,50%. Властивості представлених типів метакаоліну показані в табл. 3.

Таблиця 3

Фізико-хімічні властивості проб метакаолінів

Умовне позначення проби	Питома поверхня (за масою), м ² /кг	Дійсна густина, г/см ³	Насипна густина, кг/м ³	Водопотреба (нормальна густина), %	Активність за поглиненням СаО, мг/г
МТК ₁	1380	2,50	400	43	19
МТК ₂	1670	2,50	410	46	26
МТК ₃	1800	2,50	350	54	25

Суперпластифікатор СП₁ – це розріджувач нафталінформальдегідного (НФ) типу С-3, СП₂ – суперпластифікатор НФ-типу, модифікований добавкою-антиспінювачем ПТВ-10 та СП₃ – суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Stachement 2000 (табл. 4).

Таблиця 4

Характеристика суперпластифікаторів

Тип добавки	СП ₁	СП ₂	СП ₃
Зовнішній вигляд	Порошок темно-коричневого кольору	Порошок коричневого кольору	Рідина від яскраво-жовтого до коричневого кольору
Густина, кг/м ³	-	-	1075±30
Рекомендоване дозування, % маси цементу	0,1-1,2	0,1-1,2	0,2-1,4
Максимальне зменшення водопотреби	До 20%	До 25%	До 40%

Виходячи із міркувань забезпечення однорідності та порівнювальності вихідних параметрів та з метою усунення впливу водо-в'язучого відношення як найбільш вагомому фактору, всі зразки були виготовлені на основі сумішей з водов'язучим відношенням (відношення вмісту води і сумарного вмісту цементу та метакаоліну) 0,3.

Для модифікованих цементних паст визначали рухливість за діаметром розпливу (D_p , см), визначеним кільцем приладу Віка [9]. Для визначення усадкових деформацій були сформовані зразки-призми розмірами 4×4×16 см. Значення усадки визначали за допомогою індикатора годинникового типу (рис. 1). За початковий відлік приймали значення у віці 1 доби відразу після розпалублення зразків. Протягом досліджуваного періоду всі зразки зберігалися в повітряно-сухих умовах. За результат випробування приймали середнє значення деформацій для двох зразків. Випробування проводилися протягом 90 діб твердіння зразків (ϵ^{90} , %).

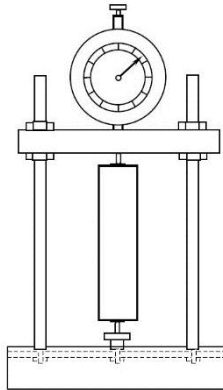


Рис. 1. Схема визначення усадки цементного каменю за допомогою індикатора годинникового типу

Результати досліджень. Було виконано три серії експериментів. На першому етапі було досліджено вплив типу суперпластифікатору та його дозування на усадкові деформації цементного каменю (табл. 5), на другому етапі визначали вплив дозування метаксаоліну на усадку (табл. 6). На третьому етапі виконано порівняння впливу типу метаксаоліну (питомої поверхні) при однаковому дозуванні (табл. 7). Витрати добавок метаксаоліну і суперпластифікатору вказані у % від маси в'язучого (цемент + метаксаолін).

Таблиця 5

Склади цементних паст та результати випробувань зразків 1-ї серії експериментів (без метаксаоліну)

№	1-1	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6	1-7	1-8	1-9	1-10
Тип СП	СП ₁	СП ₁	СП ₁	СП ₁	СП ₂	СП ₂	СП ₂	СП ₃	СП ₃	СП ₃
%СП, В'яз	0	0,25	0,5	0,75	0,125	0,25	0,375	0,1	0,2	0,3
D _p , см	8	8,5	16	21,5	8,3	16,2	21,2	14,3	21,3	23,5
ε ⁹⁰ , %	0,2313	0,2444	0,2875	0,2866	0,2025	0,1903	0,1972	0,2063	0,1019	0,1888

Тип суперпластифікатору та дозування впливає на усадкові деформації цементного каменю (рис. 2). Як свідчать експериментальні дані, значні дозування СП, особливо понад рекомендовані значення (СП₁), призводять до уповільнення тужавлення та твердіння та інтенсивного випарування вологи. Проте варіювання значень усадки для одного виду СП не є суттєвими. Зростання усадки при максимальному вмісті СП₃ можна пояснити неоднорідністю цементної пасту, невеликим водовідділенням.

При додаванні метаксаоліну тенденція до зростання усадкових деформацій при збільшенні вмісту СП спостерігається для різних дозувань мінеральної

добавки (табл. 6, рис. 3). При цьому тенденція набуває лінійного характеру і для кожного дозування МТК. Натомість залежність усадкових деформацій від дозування МТК носить поліноміальний характер. Мінімум досягається для дозувань 10%, що зумовлено особливостями раннього структуроутворення паст з добавкою МТК. Експериментальні дані апроксимуються рівнянням з величиною достовірності апроксимації не менше 0,9:

$$\varepsilon = A \cdot X_1 + B, \quad (1)$$

де $A = 0,0018 X_2^2 - 0,0375 \cdot X_2 + 0,2596$ (2); $B = -0,0018 \cdot X_2^2 + 0,0305 \cdot X_2 + 0,0489$ (3), X_1 – вміст суперпластифікатора, % В'яж, X_2 – частка метаколіну, % в'яж.

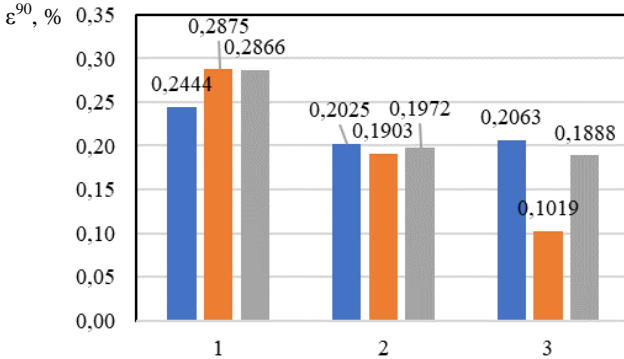


Рис. 2. Усадкові деформації цементного каменю залежно від типу і вмісту суперпластифікатора: 1-СП₁, 2- СП₂, 3- СП₃.

Таблиця 6

Склади цементних паст та результати випробувань зразків 2-ї серії експериментів (СП₁, МТК₁)

№	2-1	2-2	2-3	2-4	2-5	
%СП ₁ , В'яж	0,5	0,75	1	1,25	1,5	
%МТК ₁ , В'яж	5	5	5	5	5	
D _p , см	9,7	15	18,8	21,7	22,5	
ε ⁹⁰ , %	0,2081	0,2569	0,2709	0,3088	0,3291	
№		2-6	2-7	2-8	2-9	2-10
%СП ₁ , В'яж		0,75	1	1,25	1,5	1,75
%МТК ₁ , В'яж		10	10	10	10	10
D _p , см		10,7	14,7	17,8	19,7	21,3
ε ⁹⁰ , %		0,2338	0,2381	0,2597	0,265	0,3033
№			2-11	2-12	2-13	2-14
%СП ₁ , В'яж			1	1,25	1,5	1,75
%МТК ₁ , В'яж			15	15	15	15
D _p , см			9,3	12,4	14,5	15,8
ε ⁹⁰ , %			0,2134	0,237	0,2780	0,2881

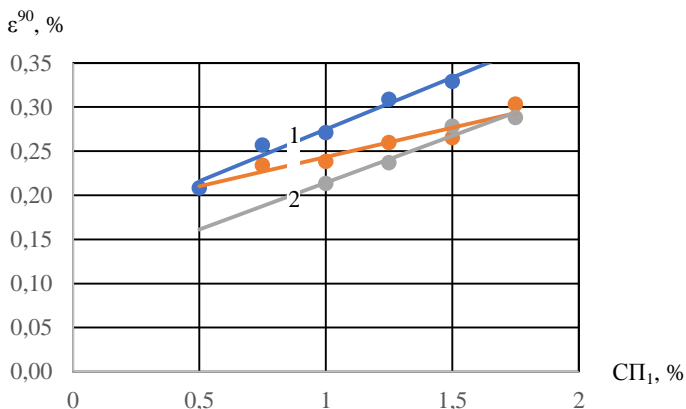


Рис. 3. Усадкові деформації цементного каменю при вмісті метакаооліну МТК₁=5% (1), МТК₁=10%, МТК₁=15%.

Збільшення питомої поверхні метакаооліну (табл. 7, рис. 4) призводить до закономірного зниження рухомості паст. При цьому не спостерігається чіткої кореляції між значеннями питомої поверхні метакаооліна та усадкових деформацій зразків цементного каменю.

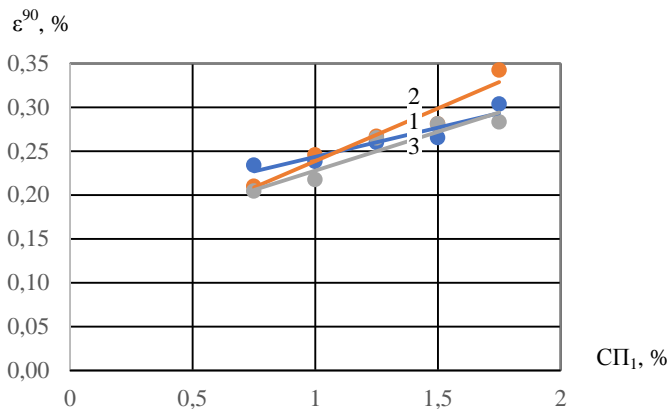


Рис. 4. Усадкові деформації цементного каменю при вмісті метакаооліну 10%: МТК₁ (1), МТК₂ (2), МТК₃(3).

Порівняння значень усадкових деформацій для зразків, виготовлених на основі паст однакової рухливості (діаметр розпливу конусу приладу Віка $D_p=20\pm 2$ см) представлено на рис. 5. Наведені дані підтверджують домінуючу роль вмісту суперпластифікатора на цей показник.

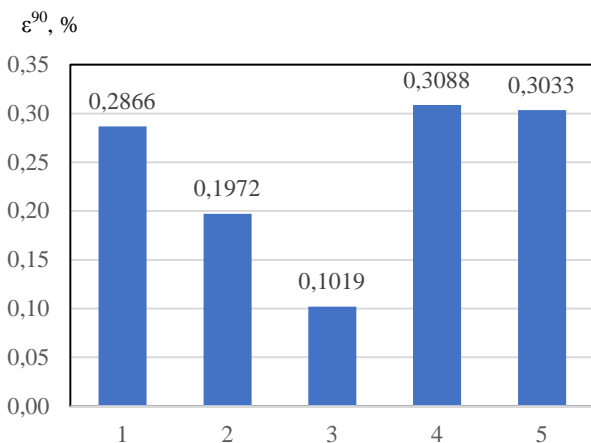


Рис. 5. Усадкові деформації цементного каменю при однаковому рдіаметрі розпливу: 1 – СП₁=0,75%, 2 – СП₂=0,375%; 3 - 0,2%; 4 – СП₁=1,25%, МТК₁=5%, 5 – СП₁=1,75%, МТК₂=10%, МТК₁=15%.

Висновки. Найбільший вплив на усадкові деформації досліджуваних зразків цементного каменю за сталого водов'язучого відношення здійснює дозування суперпластифікатору. При введенні метаксаоліну ця залежність носить лінійний характер. Зміна питомої поверхні метаксаоліну не має суттєвого впливу на зміну усадки. Оптимальний вміст метаксаоліну з точки зору мінімізації усадкових деформацій – 10% від маси вяжучого. Це зумовлено високою водоутримуючою здатністю метаксаоліну, що перешкоджає швидкому поверхневому висиханню зразків та зменшення загального об'єму цементу. Зменшення відкритої пористості цементного каменю, відзначене в попередніх дослідженнях, вказує на зниження інтенсивності вологообміну з навколишнім середовищем при активному формуванні новоутворень.

1. Navy E.G. Fundamentals of High Strength High Performance Concrete, Concrete design and construction series, Longman Group Ltd, 1996, 340 p.
2. De Schutter G., Bartos P.J.M. Self-Compacting Concrete, Whittles Publishing, CRC Press LLC, 2008, 288 p.
3. Raoufi K., Pour-Ghaz M., Poursae A., Weiss J. Restrained Shrinkage Cracking in Concrete Elements: Role of Substrate Bond on Crack Development, Journal of Materials in Civil Engineering, 2011, 23(6) 895-902.
4. Menu B., Bissonnette B., Jolin M., Ginouse N. Evaluation of early age shrinkage cracking tendency of concrete, Proceedings of the CSCE Annual Conference on Leadership in Sustainable Infrastructure, Vancouver, Canada, June 2017, pp. EMM649-1-EMM649-8.
5. Kaprielov S. and Sheinfeld A. Influence of Silica Fume/Fly Ash/Superplasticizer Combinations in Powder-like Complex Modifiers on Cement Paste Porosity and Concrete Properties, 2000, Vol.195, pp. 383-400.

6. Dvorkin L., Lushnikova N., Bezusyak A., Ribakov Y. Using mathematical modeling for design of self compacting high strength concrete with metakaolin admixture// *Construction and Building Materials*. Original Research Article. Vol. 37, Dec 2012, pp. 851–864.
7. Дворкин Л.И., Кириченко И.О., Лушникова Н.В. Свойства цементного камня с комплексной добавкой на основе метакАОлина// Сборник докладов VI международной научно-практической конференции “Дни современного бетона”. – Запорожье: ООО “Релаксол”, 2004. – С. 215-219.
8. Лушнікова Н.В., Скрипник І.Г. Особливості початкового структуроутворення цементних систем з добавкою ПФМ на основі метакАОліну та суперпластифікатору// Вісник НУВГП: Зб. наук. праць.– Рівне: НУВГП, 2004. – Вип. 4 (28), ч. 2. – С. 137-145.
9. Безусяк О.В., Лушнікова Н.В. Вплив комплексної добавки на основі суперпластифікатору та метакАОліну на водопоглинання і параметри пористості цементного каменю// Ресурсоекономні матеріали, конструкції будівлі та споруди. Зб. наук. праць. - Рівне: НУВГП, 2017. – Вип. 34. – С.10-17./ Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/rmkbs_2017_34_4.
10. Aitcin P.-C. Flatt R. *Science and Technology of Concrete Admixtures*, 1st edition. Woodhead Publishing, 2016, 666 p.
11. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. – М.: Стройиздат, 1979. – 344 с.
12. Wild S., Khatib J.M., and Roose L.J. Chemical shrinkage and autogenous shrinkage of Portland cement – metakaolin pastes, *Advances in Cement Research*, 1998, 10(3)pp. 109-119.
13. Lu D., Luo J., Xu Z. Effect of Metakaolin on the Drying Shrinkage Behaviour of Portland Cement Pastes. In: Scrivener K., Favier A. (eds) *Calcined Clays for Sustainable Concrete*. RILEM Bookseries, Springer, Dordrecht, 2015, Vol. 10, p. 569.
14. Gleize P., Cyr M., Escadeillas G. Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes, *Cement and Concrete Composites*, 2007, 29(2) pp. 80-87.
15. Jianxia S. 6.14. Durability design of concrete Hydropower structures. In: *Comprehensive Renewable Energy*, T. Letcher (Ed.), Elsevier, 2012, 4422 p.
16. Collepardi M., Collepardi S., Troli R. *Il nuovo calcestruzzo*, Tintoretto, 2009, 533 p.
17. Brooks, J.J & Johari M., Azmi M. Effect of metakaolin on creep and shrinkage, *Cement and Concrete Composites*, 2001, 23, pp. 495-502.
18. Güneysi E., Gesoğlu M., Mermerdaş K. Improving strength, drying shrinkage, and pore structure of concrete using metakaolin, *Materials and structures*, 2008, 41(5) pp. 937 – 949.
19. Khatib J.M., Baalbaki O., El Kordi A.A. Metakaolin. Chapter 15 in: Suddique R., Cachim P. (Eds.) *Waste and Supplementary Cementitious Materials in Concrete*. Woodhead publishing, Cambridge, pp. 493-511.
20. Poppe, A.-M. & De Schutter G. Creep and shrinkage of self-compacting concrete. *International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete*, RILEM Proceedings: PRO; 2005 (42) pp. 329-336.
21. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Расчетное прогнозирование свойств и проектирование составов бетонов. Учебно-практическое пособие. – М.: Инфра-Инженерия, 2016. – 386 с.

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ВОДНИХ СУСПЕНЗІЙ МІКРОНАПОВНЮВАЧІВ З СУПЕРПЛАСТИФІКАТОРАМИ 3

RESEARCH OF PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF AQUEOUS SUSPENSIONS OF MICROFILLERS WITH SUPERPLASTICATORS

Беліченко О.А., к.т.н., ст. наук. співр., ORCID ID: 0000-0002-7444-8188,
Толмачов С.М., д.т.н., професор, ORCID ID: 0000-0003-1011-3861
(Харківський національний автомобільно-дорожній університет)

Belichenko O.A., candidate of technical sciences (engineering), Senior Researcher, ORCID ID: 0000-0002-7444-8188, Tolmachov S.M., doctor of technical science (engineering), professor, ORCID ID: 0000-0003-1011-3861 (Kharkov national automobile and highway University)

У статті наведено результати досліджень рН і електрорушійної сили водних суспензій мікронаповнювачів, а також їх сумішей з суперпластифікаторами. Досліджено вплив концентрацій суперпластифікаторів різного хімічного складу на кінематичну в'язкість і поверхневий натяг водних розчинів, що містять ці добавки. Отримано залежності зміни цих показників у часі.

In the technology of modern high-performance concretes, a complex of additives consisting of micro-fillers and highly effective superplasticizers is widely used. Since microfillers have different mineral composition and level of dispersion, there are some contradictions in the views on the mechanism of their action, which require clarification.

Modern highly effective superplasticizers have different chemical bases. The basis of modern superplasticizers is carboxylate, melamine formaldehyde or naphthalene formaldehyde compounds, as well as mixtures thereof with purified lignosulfonates. This leads to the fact that the effect of superplasticizers varies greatly.

Existing methods for determining the effectiveness of microfillers and superplasticizers require a lot of time for testing and special equipment. Therefore, it is advisable to use simpler physicochemical methods, as well as simpler instruments for measuring the effectiveness of the use of chemical and mineral additives in concrete.

In studies, crushed quartz and limestone microfillers were used. Based on them, aqueous suspensions were prepared at a concentration of 10%. Polycarboxylate and naphthalene formaldehyde superplasticizers were used as chemical additives.

The article presents the results of studies of pH and the electromotive force of aqueous suspensions of microfillers, as well as their mixtures with superplasticizers. The effect of concentrations of superplasticizers of various chemical compositions on the kinematic viscosity and surface tension of aqueous solutions containing these additives is investigated. The dependences of the change in these indicators over time are obtained. Based on the data obtained, it is possible to determine how the electrochemical properties of suspensions change over time.

Ключові слова: високофункціональні бетони, мікронаповнювач, суперпластифікатор, органо-мінеральний комплекс, поверхнево-активна речовина.

High-performance concrete, microfiller, superplasticizer, organo-mineral complex, surfactant

Вступ. У практиці світового будівництва широко застосовують високофункціональні бетони (НРС). До складу таких бетонів, крім традиційних заповнювачів і хімічних добавок, входять тонкоподрібнені мінеральні частинки – мікронаповнювачі (МКН). Більшість дослідників НРС вважають, що основними завданнями мікронаповнювачів є зміна реологічних характеристик бетонних сумішей і ущільнення структури бетонів. У бетонах застосовують наповнювачі різного мінерального і хімічного складу. Однак, їх застосування в бетонах базується на закономірностях, отриманих експериментально. Експериментальні дослідження займають багато часу і не дозволяють сформулювати теоретичні уявлення про механізм дії мікронаповнювачів, або комплексу мікронаповнювач + суперпластифікатор (СП). Це може привести до великих помилок в прогнозуванні властивостей НРС і оцінці їх довговічності. Експериментальні та практичні результати різних авторів показують, що кількість МКН і СП, яке застосовують в бетонах, відрізняється. Тому актуальним є оцінка ефективності застосування МКН і комплексу МКН + СП за допомогою фізико-хімічних методів дослідження.

Аналіз останніх досліджень. Мікронаповнювачі зазвичай мають високу питому поверхню і поверхневу активність. Тому взаємодія активних центрів поверхні і мікронаповнювачів, може визначати властивості бетону, що твердіє [1]. Незважаючи на досить великий і багаторічний досвід використання МКН в технології бетонів існують протиріччя. З одного боку,

безсумнівним є те, що введення МКН призводить до зміни параметрів пористості, підвищує щільність, міцність і інші характеристики бетону. З іншого боку застосування МКН підвищує водопотребу бетонних сумішей і призводить до зниження міцності бетонів. Для боротьби з недоліками МКН запропоновано застосовувати комплекс добавок: МКН + СП. Крім того, запропоновані інші способи підвищення ефективності застосування МКН. Наприклад, недоліком застосування мікрокремнезему в складі органо-мінеральної добавки є його негативний вплив на легкоукладальність сумішей. Тому до складу органо-мінерального комплексу запропоновано поряд із суперпластифікатором і мікрокремнеземом вводити зольні мікросфери [2]. Це допомагає поліпшити реологічні характеристики бетонних сумішей. Крім того, пуцоланова активність зольних мікросфер дозволяє зв'язувати $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в гідросилікати. Зростає щільність зони контакту, що призводить до поліпшення міцності і довговічності бетонів. В роботі [3] показано, що, застосування пуцоланових добавок разом з суперпластифікаторами нового покоління, дозволяє отримати високоміцні і довговічні бетони. У роботі Р. Фельдмана [4] показано, що при введенні до складу бетону мікрокремнезему відбувається зменшення радіуса пор, що призводить до ущільнення структури цементного каменю.

Відомо, що пористість бетону змінюється у часі. У початковий період твердіння пористість може бути високою, але пізніше, за рахунок реакції мікронаповнювачів з новоутвореннями цементу, пори будуть заростати продуктами реакцій, а бетон буде ущільнюватися. Цей механізм описаний у багатьох статтях, наприклад, в статті I. Marković, де приведена модель ущільнення [5]. За даними деяких авторів ущільнення затверділого цементного каменю залежить від відстані між поруч стоячими ділянками поверхні взаємодіючих частинок, які є центрами кристалізації [6].

В системі, яка містить органо-мінеральний комплекс, що складається з СП і МКН, важливу роль відіграє концентрація мікрочастинок наповнювача. СП зменшить кількість води в бетонній суміші і тим самим відстань між частинками. Мікронаповнювач наситить систему мікрочастинками. Це призводить до ущільнення цементного каменю, створення обмежених умов, в яких здійснюється спрямоване утворення і зростання новоутворень в цементі, що твердіє. Існує оптимальний вміст частинок мікронаповнювача, при якому щільність максимальна. Відомо, що збільшення вмісту дрібних фракцій у складі піску, а також пилюватих частинок в складі заповнювачів знижує ефективність застосування суперпластифікаторів. Для досягнення необхідного ефекту зазвичай збільшують кількість суперпластифікатора. Логічно припустити, що СП адсорбується на поверхні дрібних частинок. Інші дослідники стверджують, що адсорбція аніоноактивних СП на поверхні кремнезему неможлива тому, що адсорбент і адсорбат мають однакові знаки заряду. В основному дослідники вважають, що механізм дії

суперпластифікаторів нафталінового і меламінового рядів є адсорбційним і має іонно-електростатичну природу [1, 7 – 10].

Іонно-електростатичний механізм дії суперпластифікаторів підтверджується наступними явищами:

– різної виборчої адсорбцією СП по відношенню до мінеральних порошоків, яка залежить від потенціаловизначаючих іонів і різниці в полярностях води і твердої фази;

– вибірковістю суперпластифікаторів при адсорбції на мінералах.

Це дозволяє говорити про можливість вибіркової адсорбції різних СП на частинках з різною полярністю поверхні.

Ми припустили, що механізм впливу органо-мінерального комплексу не обмежується тим, що ущільнюється структура цементного каменю. При одночасному введенні суперпластифікатора і мікронаповнювача між ними можлива взаємодія. Наявність взаємодії можна оцінити за зміною колоїдно-хімічних і хімічних властивостей розчинів мікрочастинок.

Структурні формули сучасних суперпластифікаторів за даними [11] представлені на рис. 1, 2.

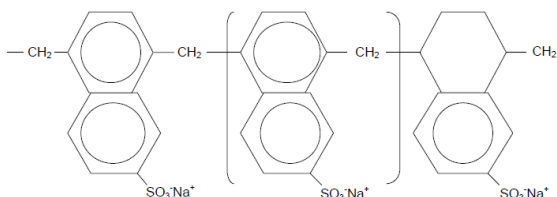


Рис.1. Структурна формула СНФ – сульфонафталіноформальдегіда

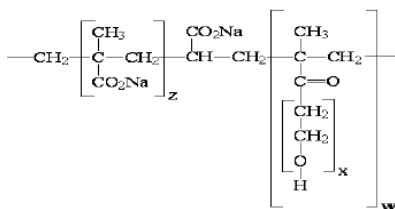


Рис. 2. Структурна формула полікарбоксилата

З огляду на це можна припустити, що нафталін формальдегідні суперпластифікатори адсорбуються лінійно, а карбоксилати –об'ємно. При цьому, характер адсорбції різний: в першому випадку може переважати хімічна адсорбція, у другому – фізична адсорбція.

Згідно з уявленнями Е.Д. Щукіна можливі два випадки адсорбції [12]:

1 випадок – концентрація поверхнево-активної речовини (ПАР), якими є ці суперпластифікатори низька. Тоді при адсорбції ПАР на твердій полярній

поверхні молекули ПАР розташовуються полярною групою на поверхні твердого тіла, а вуглеводневий ланцюг звернений у водне середовище (рис.3, а). Ця адсорбція може бути хімічною або фізико-хімічною.

2 випадок – концентрація ПАР висока. Коли вся поверхня покрита шаром молекул ПАР, відбувається повторна адсорбція. Ця адсорбція фізична. Утворюється другий шар ПАР, в якому вуглеводневий ланцюг звернений до вуглеводневого ланцюга першого шару, а полярна група знаходиться у воді (рис. 3, б). При такому розташуванні молекул ПАР вода легко проникає до поверхні і змочуваність твердого тіла поліпшується.

Було встановлено, що присутність на поверхні мікронаповнювачів сильних льюїсовських центрів збільшує вміст іонів OH^- в зоні контакту між добавкою і цементом, локально знижуючи рН і сприяючи переходу в розчин іонів кальцію для компенсації негативного заряду [1, 13, 14].

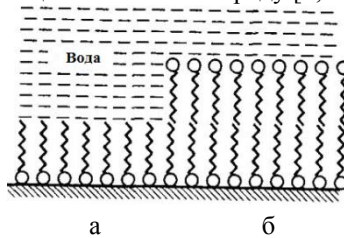


Рис. 3 Орієнтація молекул ПАР на межі поділу фаз «полярне тверде тіло – водний розчин»: а) при малих концентраціях ПАР; б) при великих концентраціях ПАР

На початковому етапі гідратації цементної суспензії поверхня мінеральної добавки, взаємодіючи переважно з водою, змінює два основні показники активності такої суспензії – рН і ЕРС. Активаторами процесів гідратації клінкерних мінералів є мікронаповнювачі, які можуть зрушувати рН системи в область більш низьких значень. Зрушення ЕРС в сторону більш позитивних значень повинно сприяти прискоренню гідратації.

Метою даної роботи є: Дослідження впливу мікронаповнювачів різної природи і дисперсності на фізико-хімічні властивості водних суспензій з суперпластифікаторами і без них.

Методика досліджень. Як мікронаповнювачі в дослідженнях застосовували мікрокремнезем і подрібнену крейду. Мікронаповнювачі отримували шляхом подрібнення в кульовому млині. Питома поверхня мікрокремнезема становила $S_{\text{пит}} = 281 \text{ м}^2/\text{кг}$ і $S_{\text{пит}} = 980 \text{ м}^2/\text{кг}$. Питома поверхня крейди становила $S_{\text{пит}} = 328 \text{ м}^2/\text{кг}$ і $S_{\text{пит}} = 1040 \text{ м}^2/\text{кг}$. Мікронаповнювачі були умовно розділені на дві групи: перша група – з дисперсністю $\approx 300 \text{ м}^2/\text{кг}$ і друга група – з дисперсністю $\approx 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$. Суперпластифікатори: нафталінформальдегідний Sika Gold і полікарбоксилатний Sika Plast 2508.

Із мікронаповнювачів готували 10 % водні суспензії і за допомогою

приладу рН-метра визначали рН і ЕРС суспензій (рис. 4). При проведенні експериментів суспензії мікронаповнювачів і розчини суперпластифікаторів витримували при постійній температурі + 20 °С (рис. 4, а). В'язкість водних розчинів суперпластифікаторів визначали за допомогою віскозиметра з діаметром капіляра 0,54 мм. Поверхневий натяг водних розчинів суперпластифікаторів визначали за методом відриву краплі за допомогою бюретки з краном.

Результати досліджень. Дослідження показали, що при збільшенні концентрації суперпластифікаторів відбувається зниження рН в області кислих розчинів (рис. 5). Інтенсивне зниження рН відбувається до концентрації 0,6 %. Це зменшення для суперпластифікатора Sika Plast 2508 (карбоксилат) становить 0,56, а для суперпластифікатора Sika Gold (нафталінформальдегід) – 1,91. Надалі зменшення рН в розчинах з Sika Gold відбувається в меншій мірі, а в розчинах з Sika Plast 2508 спостерігається незначне підвищення рН.

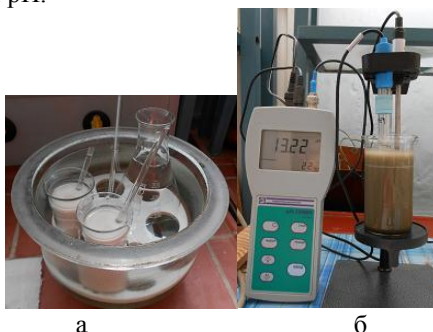


Рис. 4. Вимірювання рН і ЕРС 10% водних суспензій мікронаповнювачів: а) витримування суспензій при постійній температурі +20 °С; б) процес вимірювання рН суспензії

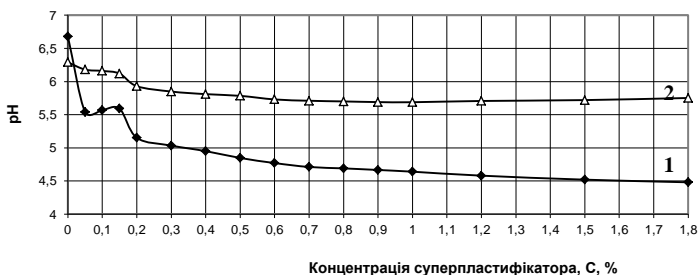


Рис. 5. Вплив концентрації суперпластифікаторів на рН водних розчинів: 1) Sika Gold; 2) Sika Plast 2508

При концентрації добавки Sika Gold $C = 0,05\%$ спостерігається мінімум значення рН. Зниження рН становить 1,14. В значно меншій мірі це зниження помітно для розчину добавки Sika Plast 2508. Надалі до концентрацій $C = 0,15\%$ на графіках рН змінюється незначно. Далі в області концентрацій добавок $C = 0,15\ldots 0,2\%$ спостерігається друге різке зниження рН. Можливо те, що більше зниження рН в розчинах з добавкою Sika Gold можна пояснити більшою величиною заряду асоціатів молекул цієї добавки в порівнянні з молекулами добавки Sika Plast 2508.

Дослідження зміни величини ЕРС показали інтенсивне зростання ЕРС розчинів з добавкою Sika Gold спочатку при збільшенні концентрації від 0 до $0,05\%$, а далі – від $0,15\%$ до $0,2\%$ (рис. 6). На графіку зміни ЕРС розчинів з добавкою Sika Plast 2508 очевидно значне збільшення ЕРС тільки в області від $C = 0$ до $C = 0,2\%$.

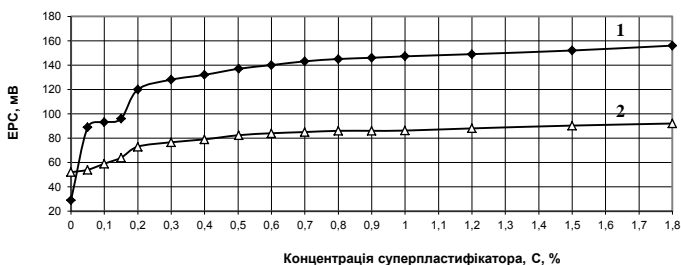


Рис. 6. Вплив концентрації суперпластифікаторів на ЕРС водних розчинів: 1) Sika Gold; 2) Sika Plast 2508

Були проведені дослідження кінематичної в'язкості водних розчинів добавок (рис. 7), які показали, що в'язкість різко знижується при концентраціях $C = 0,05\%$ (добавка Sika Gold) і $C = 0,1\%$ (добавка Sika Plast 2508). Відомо, що таке зниження в'язкості водних розчинів відповідає критичній концентрації міцелотворення (ККМ) поверхнево-активних речовин (ПАР). Отримані результати свідчать про те, що за допомогою аналізу зміни рН і ЕРС водних розчинів ПАР можна визначати не тільки ККМ, а й, імовірно, інші колоїдно-хімічні характеристики ПАР.

Дослідження поверхневого натягу водних розчинів суперпластифікаторів показали, що зі збільшенням концентрації суперпластифікаторів обох типів поверхневий натяг води знижується (рис. 8). На графіках є екстремальні точки перелому кривих в областях концентрацій: $0,35\%$ для розчину суперпластифікатора Sika Plast 2508 і $0,4\%$ для розчину суперпластифікатора Sika Gold. При подальшому збільшенні концентрацій розчинів цих добавок поверхневий натяг не змінюється.

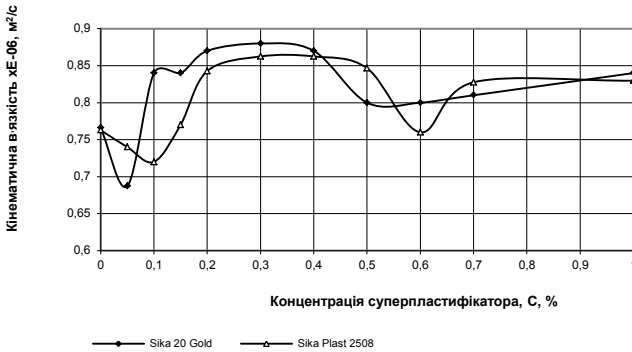


Рис. 7. Вплив концентрації суперпластифікаторів на в'язкість водних розчинів

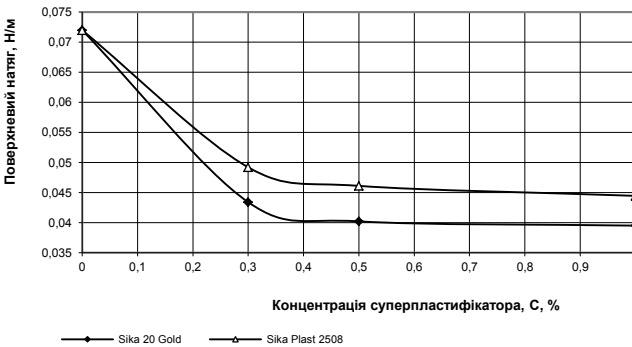


Рис. 8. Вплив концентрації суперпластифікаторів на поверхневий натяг водних розчинів

Були проведені дослідження зміни рН і ЕРС орґано-мінеральних комплексів, які складаються із суперпластифікатора і мікронаповнювача. Мікронаповнювачами були крейда і мікрокремнезем. Питома поверхня мікронаповнювачів була однаковою $S_{\text{пит}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Дослідження показали, що в суспензіях, що містять мікрокремнезем і крейду, при збільшенні концентрації суперпластифікаторів відбувається зниження рН (рис. 9). При цьому, початкове значення рН майже в два рази вище, ніж рН водних розчинів суперпластифікаторів (рис. 5). На кривих з суперпластифікатором Sika Gold можна побачити два екстремуми: мінімум при концентрації суперпластифікаторів $C = 0,2 \%$ і максимум при концентрації суперпластифікаторів $C = 0,3 \%$. Мінімум рН суспензій з добавками відповідає другому мінімуму рН водних розчинів суперпластифікаторів (рис. 5). Екстремуми для суспензій з добавкою Sika Plast 2508 відсутні.

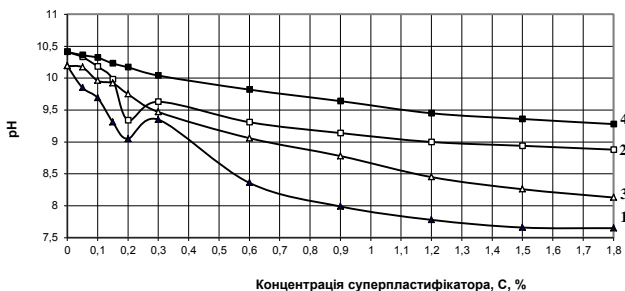


Рис. 9. Зміна рН суспензій мікронаповнювачів з добавками: 1) мікрокремнезем + Sika Gold; 2) крейда + Sika Gold; 3) мікрокремнезем + Sika Plast 2508; 4) крейда + Sika Plast 2508

Дослідження ЕРС суспензій з суперпластифікаторами показали, що знак ЕРС чистих суспензій змінюється на негативний (рис. 10). ЕРС досягає значень -190 мВ, що по абсолютній величині значно вище, ніж значення ЕРС водних розчинів суперпластифікаторів (рис. 6). Збільшення концентрації суперпластифікаторів призводить до адекватного зменшення від'ємності ЕРС. Екстремальний характер ця залежність має в разі суспензії мікрокремнезема у водному розчині суперпластифікатора Sika Gold. Там є виражений максимум, який відповідає концентрації Sika Gold $C = 0,2\%$ і мінімум, який відповідає концентрації Sika Gold $C = 0,3\%$. Максимум збігається з екстремумом на рис. 9.

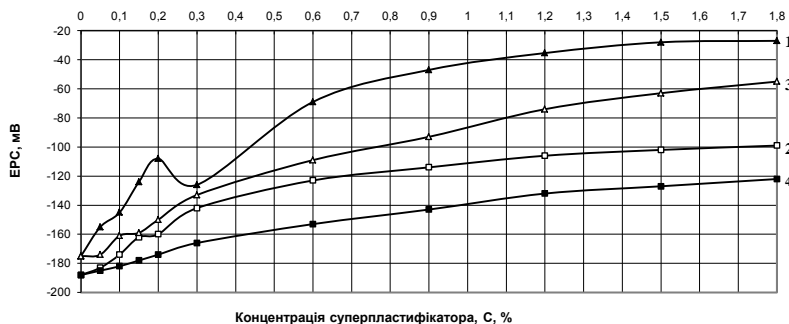


Рис. 10. Зміна ЕРС суспензій мікронаповнювачів з добавками: 1) мікрокремнезем + Sika Gold; 2) крейда + Sika Gold; 3) мікрокремнезем + Sika Plast 2508; 4) крейда + Sika Plast 2508

Для уточнення характеру впливу добавок на властивості водних суспензій мікронаповнювачів в дослідженнях змінювали дисперсність наповнювачів. Можна відзначити, що наведені залежності для наповнювачів з питомою поверхнею $S_{\text{пит}} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$ принципово не відрізняються від залежностей для наповнювачів з питомою поверхнею $S_{\text{пит}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$.

Дослідження впливу часу витримування суспензій мікронаповнювача в часі показали, що на кривих залежностей спостерігається значне збільшення рН і, відповідне йому зміна ЕРС, через 15 хвилин після виготовлення суспензій (рис. 11, 12).

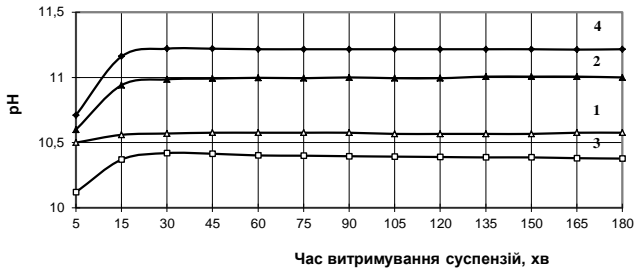


Рис. 11. Вплив часу витримування 10 % суспензій на рН: 1) мікрокремнезем $S_{\text{пит}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2) крейда $S_{\text{пит}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3) мікрокремнезем $S_{\text{пит}} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$; 4) крейда $S_{\text{пит}} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$

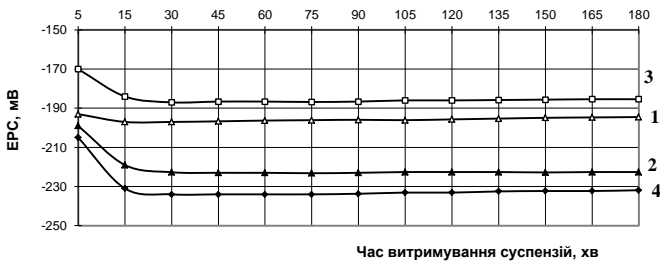


Рис. 12. Вплив часу витримування 10 % суспензій на ЕРС: 1) мікрокремнезем $S_{\text{пит}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 2) крейда $S_{\text{пит}} = 300 \text{ м}^2/\text{кг}$; 3) мікрокремнезем $S_{\text{пит}} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$; 4) крейда $S_{\text{пит}} = 1000 \text{ м}^2/\text{кг}$

Ці зміни спостерігається для обох видів мікронаповнювачів і не залежать від їх дисперсності. Надалі, при витримуванні суспензій в часі до 180 хвилин ніяких змін на графіках не спостерігається.

Висновки. 1. Показано, що при збільшенні концентрації суперпластифікаторів рН водних розчинів знижується. При цьому ЕРС водних розчинів збільшується.

2. При введенні суперпластифікаторів в суспензії мікронаповнювачів спостерігається аналогічне зниження рН розчинів. Введення в суспензії мікронаповнювачів суперпластифікаторів зменшує електронегативність ЕРС. Значення ЕРС збільшуються в бік позитивних значень. Збільшення вмісту в водній суспензії суперпластифікаторів призводить до поступової нейтралізації негативного знака заряду ЕРС.

3. Виходячи з наведених даних, можна вважати можливим адсорбцію суперпластифікаторів на мінеральних наповнювачах незалежно від їх мінерального складу і знака поверхневого заряду.

4. Точки екстремальної зміни рН і ЕРС на графіках залежностей є точками критичної концентрації міцелоутворення суперпластифікаторів в присутності мікронаповнювачів.

5. Встановлено, що стійкість суспензій мікронаповнювачів в часі суттєво змінюється в перші 15 хвилин після приготування суспензій і не залежить від виду і дисперсності мікронаповнювачів.

1. Юхневский П.И. Влияние химической природы добавок на свойства бетонов. Минск : БНТУ, 2013. 310 с.
2. Саградян А.А., Симакова Г.А. Изучение свойств тяжелого бетона модифицированного органоминеральной добавкой, включающей зольные микросферы. *Известия Вузов. Строительство и архитектура*. 2012. № 4. С. 26–31.
3. Сохошко Е.В. Зайченко Н.М. Самоуплотняющийся бетон в современном монолитном домостроении. *Сучасні будівельні матеріали*. 2009. Вип. 1 (75). С. 112–116.
4. Feldman R.F. Pore Structure, Permeability and Diffusivity as Related to Durability. *8th International Congress on the Chemistry of Cement*. 1986. P. 1–21.
5. Markovic I. High-Performance Hybrid-Fiber Concrete – Development and Utilisation. *DUP Science*. The Netherlands. 2006. ISBN 90-407-2621-3
6. Шейнфельд А.В. Особенности формирования иерархической микро- и наноструктуры цементных систем с комплексными органоминеральными модификаторами. *Бетон и железобетон*. 2016. № 2. С. 16–21.
7. Невиль А.М. Свойства бетона / Пер. с англ. В.Д. Парфенов, Т.Ю. Якуб. Москва : Стройиздат, 1972. 334 с.
8. Rauen A. Yum Wirkungsmechanism von Betonβverflusigern auf der Basis von Wasserloslichen Melaminharzen. *Cement and Concrete Research*. 1976. Vol. 6. № 1. P. 57–61.
9. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. Москва, Стройиздат, 1989. 188 с.
10. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Москва, Стройиздат, 1998. 768 с.
11. Красовский П.С. Физико-химические свойства формирования структуры цементных бетонов. Хабаровск, Изд-во ДВГУПС, 2013. 204 с.

12. Щукин Е.Д., Перцова А.В., Амелина Е.А. Коллоидная химия. Москва, Высш. шк., 2007. 444 с.
13. Шангина Н.Н. Прогнозирование физико-механических характеристик бетонов с учетом донорно-акцепторных свойств поверхности наполнителей и заполнителей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / ПГУПС. Санкт-Петербург, 1998. 387 с.
14. Комохов П.Г., Сватовская Л.Б., Шангина Н.Н., Лейкин А.П. Управление свойствами цементных смесей природой наполнителей. *Известия Вузов. Серия «Строительство»*. 1997. № 9. С. 51–54.
1. Yuhnevskij P.I. Vliyanie himicheskoy prirody dobavok na svojstva betonov. Minsk : BNTU, 2013. 310 s.
2. Sagradyan A.A., Simakova G.A. Izuchenie svojstv tyazhelogo betona modifitsirovannogo organomineralnoj dobavkoj, vkluchayushej zolnye mikrosfery. *Izvestiya Vuzov. Stroitelstvo i arhitektura*. 2012. № 4. S. 26–31.
3. Sohoshko E.V. Zajchenko N.M. Samouplotnyayushiyasya beton v sovremennom monolitnom domostroenii. Suchasni budivelni materiali. 2009. Vip. 1 (75). S. 112–116.
4. Feldman R.F. Pore Structure, Permeability and Diffusivity as Related to Durability. 8th *International Congress on the Chemistry of Cement*. 1986. P. 1–21.
5. Markovic I. High-Performance Hybrid-Fiber Concrete – Development and Utilisation. *DUP Science*. The Netherlands. 2006. ISBN 90-407-2621-3
6. Shejnfeld A.V. Osobennosti formirovaniya ierarhicheskoy mikro- i nanostrukturny cementnyh sistem s kompleksnymi organomineralnymi modifikatorami. Beton i zhelezobeton. 2016. № 2. S. 16–21.
7. Nevil A.M. Svojstva betona / Per. s angl. V.D. Parfenov, T.Yu. Yakub. Moskva : Strojizdat, 1972. 334 s.
8. Rauen A. Yum Wirkungsmechanism von Betonßverflüssigern auf der Basis von Wasserlöslichen Melaminharzen. *Cement and Concrete Research*. 1976. Vol. 6. № 1. P. 57–61.
9. Ratinov V.B., Rozenberg T.I. Dobavki v beton. Moskva, Strojizdat, 1989. 188 s.
10. Batrakov V.G. Modifitsirovannye betony. Teoriya i praktika. Moskva, Strojizdat, 1998. 768 s.
11. Krasovskij P.S. Fiziko-himicheskie svojstva formirovaniya struktury cementnyh betonov. Habarovsk, Izd-vo DVGUPS, 2013. 204 s.
12. Shukin E.D., Percova A.V., Amelina E.A. Kolloidnaya himiya. Moskva, Vyssh. shk., 2007. 444 s.
13. Shangina N.N. Prognozirovaniye fiziko-mehaniicheskikh harakteristik betonov s uchetoм donorno-akceptornyh svojstv poverhnosti napolnitelej i zapolnitelej : dis. ... d-ra tehn. nauk : 05.23.05 / PGUPS. Sankt-Peterburg, 1998. 387 s.
14. Komohov P.G., Svatovskaya L.B., Shangina N.N., Lejkin A.P. Upravlenie svojstvami cementnyh smesey prirodoy napolnitelej. *Izvestiya Vuzov. Seriya «Stroitelstvo»*. 1997. № 9. S. 51–54.

КОРОЗИЯ АРМАТУРИ У ЛУЖНИХ БЕТОНАХ: ПРОБЛЕМИ І ШЛЯХИ ЗАПОБІГАННЯ

CORROSION OF REINFORCEMENT IN ALKALI ACTIVATED CONCRETES: PROBLEMS AND WAYS OF PREVENTION

Бойко О. В., аспірант, ORCID 0000-0001-7521-0166, Ковальчук О. Ю. к.т.н., с.н.с., ORCID 000-00001-6337-0488

Boiko O., postgraduate, ORCID 000-00001-6337-0488, Kovalchuk O., PhD, Senior Researcher, ORCID 000-00001-6337-0488

Наведено теоретичні передумови дослідження впливу дії агресивних середовищ на високорухливі лужні бетони, армовані сталевую арматурою. Визначено об'єкт досліджень, та запропоновано шляхи вирішення проблеми корозії арматури у лужному бетоні та визначено завдання роботи.

The theoretical prerequisites for the study of the influence of corrosive media on high-mobility slag concrete, reinforced with steel reinforcement, are presented. The object of research is determined, namely the processes of formation of micro- and macrostructure of slag concrete at the stage of production of commercial mixtures and operation in reinforced concrete structures, which prevent corrosion of steel reinforcement. The hypotheses that are proposed to solve the project's tasks have been formed. The ways of solving the problem of corrosion of reinforcement in slag concrete are proposed and the task of work is determined. The scientific novelty of the chosen direction of research is presented: in determining the regularities of the manifestation of the structure of slag concrete obtained from high-mobility mixtures, the ability to self-repair in order to ensure the passive state of steel reinforcement, including the application of corrosion inhibitors and the surface of concrete anti-corrosion coating ions; development of reliable ideas about the mechanism of transport of ions, aggressive towards steel reinforcement, in the structure of plasticized slag concrete; in identifying patterns of incorporation of Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} ions into the composition of hydrated neoplasms of slag cement, ie in the management of the buffering ability of the concrete microstructure; in the development of methodology for assessing the state of steel reinforcement in plasticized slag concrete with the identification and development of reliable methods of analysis based on the latest developments of the world community.

Ключові слова

Бетон, арматура, залізобетон, корозія, луги, карбонізація, сульфати, хлориди.
Concrete, reinforcement, reinforced concrete, corrosion, alkalis, carbonation, sulfates, chlorides.

Вступ. Бетонні і залізобетонні вироби, конструкції та штучні споруди під час експлуатації піддаються активному впливу атмосферних факторів і агресивних компонентів середовища: кислих газів, у першу чергу CO_2 і SO_3 ; розчинів електrolітів – хлоридів і сульфатів; промислових викидів та продуктів неповного згоряння палива та інших сполук [1–3]. У результаті цих процесів руйнується захисний шар залізобетону, що призводить до доступу повітря і вологи до армуючих елементів, і, відповідно, кородує металева арматура, що в кінцевому рахунку призводить до виходу із ладу конструкції.

Значний вплив на проблематику виникнення корозії сталеві арматури в бетоні має зміна технології проведення будівельних робіт, зокрема, значний перехід від технології збірного залізобетону до монолітних конструкцій будівель і споруд. Справа в тому, що підвищення рухливості бетонної суміші значною мірою досягається підвищенням вмісту води у складі загальної суміші, що призводить до зміни характеру пористості і підвищення загальної пористості системи. У випадку використання ефективних пластифікуючих добавок має місце інша проблема – значний вміст додаткових хімічних елементів у складі бетонної суміші значно підвищує ризики протікання хімічних реакцій у складі цементного каменю, що також може негативно вплинути на захисні властивості по відношенню до сталеві арматури.

Також треба враховувати, що сучасні технології промисловості будівельних матеріалів активно використовують відходи виробництва, такі як золи, шлаки, золошлакові суміші, тощо, для виготовлення безцементних в'язучих речовин і в'язучих речовин зі зниженим вмістом клінкеру, що спонукає до необхідності вирішувати питання довговічності бетонних і залізобетонних конструкцій навіть при експлуатації в звичайних атмосферних умовах (житлові, адміністративні будівлі тощо).

Ліквідація наслідків корозії вимагає суттєвих матеріальних і людських ресурсів, створює економічні, технічні та логістичні проблеми в державних та регіональних масштабах, подекуди вимагає знесення об'єктів житла чи інфраструктури і зведення наново. Тому актуальність проблеми вторинного захисту від атмосферної корозії бетонних і залізобетонних конструкцій, яка передбачає нанесення на їх поверхню спеціальних сумішей і створення бар'єрного прошарку, не викликає сумніву. Таким чином, захист арматури у складі залізобетонних конструкцій доцільно проводити у двох напрямках одночасно – на рецептурному рівні (хімічний захист арматури бетонною матрицею) та на технічному рівні (фізичне нанесення захисного покриття на готові залізобетонні конструкції).

Постановка проблеми

Проблема корозії арматури у бетоні характерна не тільки для умов використання традиційних в'язучих речовин (портландцементу та його різновидів), але й для випадків використання нових, нетрадиційних цементів та в'язучих речовин. Одними із таких цементів є лужні цементи, запропоновані проф. В.Д. Глуховським, які на сьогодні є одними із найактуальніших цементних систем у світі. В першу чергу, значна увага приділяється таким цементам через можливість використовувати у якості сировинних матеріалів промислові відходи та супутні продукти виробництва, дозволяючи повністю виключити із технологічного циклу високотемпературні процеси та, відповідно, знизити емісію вуглекислого газу у атмосферу. Іншим важливим аспектом є те, що лужні цементи характеризуються цілим спектром високих та унікальних експлуатаційних властивостей, зокрема, високою імібілізуючою здатністю, низьким тепловідленням, високою корозійною стійкістю, тощо. В цілому, процеси структуроутворення лужних цементів та захисні властивості матриці по відношенню до сталеві арматури побідні, але є й певні відмінності, що потребують додаткового вивчення.

Як відомо [4], цементний камінь є джерелом утворення капілярно-пористої структури у бетоні та визначає, в основному, його стійкість до впливу різноманітних агресивних середовищ. Проникнення агресивного середовища у бетон відбувається по капілярах, число яких визначається кількістю води затворювання бетонної суміші, у зв'язку з цим, природно, чим нижче водоцементне співвідношення, тим щільніший бетон і вища його хімічну стійкість. Саме тому виникнення корозії в лужних бетонах отриманих на основі жорстких бетонних сумішей не спостерігається.

Тривалими дослідженнями і спостереженнями за станом арматури у лужних бетонах [5,6] було підтверджено відсутність корозії сталеві арматури, однак з огляду на широке впровадження в будівництво промислових відходів, в тому числі таких, що містять солі сильних кислот, проблема корозійної стійкості арматури набула особливої актуальності. Крім того, варто відзначити, що у приведених дослідженнях використовували жорсткі та наджорсткі бетонні суміші, а лужний компонент у складі цементу був представлений розчинами карбонату або силікату натрію (силікату калію), що обумовлювало високу активність таких систем одночасно із високим ступенем ущільнення структури матеріалу. Перехід в умовах сьогодення до використання однокомпонентних цементних систем, лужний компонент яких представлений сухою сіллю лужних металів, а також використання рухливих та високорухливих бетонних сумішей обумовлюють отримання менш щільної структури штучного каменю затверділого бетону, що знижує захисну функцію цементної матриці та відкриває шляхи до корозії сталеві арматури у складі бетону на основі лужних в'язучих речовин.

Проблема сягнула такого рівня у світовому масштабі, що у 2018 році було створено робочу групу у рамках діяльності комітету RILEM «Steel corrosion in alkali activated materials», якій підкреслив масштаб проблематики та визначив напрямки досліджень різних груп та наукових шкіл в цьому напрямку. Зокрема, буде досліджено відмінності між традиційними та лужними цементами (у сфері хімізму процесу та хімії міжпорової рідини), вчення існуючих стандартів щодо встановлення корозії арматури у бетоні та їх адаптація до лужних цементів та бетонів, дослідження впливу виду арматури та її поверхні на перебіг процесу корозії у лужних цементах, вплив форми елементів на перебіг процесів корозії арматури, дослідження порової структури матеріали і впливу її зміни на корозійні процеси, вивчення реальних систем із додатковим введенням хлоридів та іонів, вивчення зміну потенціалу системи та ін. Подано заявку на дослідження цієї проблематики у рамках європейської програми COST ACTION.

Дослідженнями [7], в основу яких покладений гравіметричний метод, встановлено, що корозійна стійкість сталевної арматури залежить від складу дисперсного середовища в'язучих, в яких присутні різні іони. При цьому можливість пасивації металу визначається співвідношенням в дисперсному середовищі пасивуючих і активуючих іонів. Якщо в ньому переважають активуючі іони (Cl^- , SO_4^{2-}), пасивація сталі ускладнюється, а якщо пасивуючі (OH^- , CO_3^{2-}) – останні витісняють з поверхні металу активуючі іони і перешкоджають розвитку корозії. Лужні компоненти, що містять у своєму складі іони Cl^- або SO_4^{2-} суттєво не впливають на депасивацію сталі, так як вони повністю подавляються іонами OH^- , які через свою спорідненість до металу витісняють агресивні іони з поверхні металу, забезпечуючи його пасивний стан.

З метою визначення взаємовпливу вмісту агресивних і пасивуючих солей в лужному компоненті на стійкість арматури у складі лужних бетонів, у Науково-дослідному інституті в'язучих речовин і матеріалів Київського національного університету будівництва і архітектури було досліджено втрату маси арматури в бетоні на синтезованих лужних компонентах, які складались із суміші карбонату і сульфату натрію, а також карбонату і хлориду натрію у співвідношенні 1:1. Підвищення вмісту сульфату натрію до 50% в бетоні на доменних шлаках не підвищує втрату маси металу, і при цьому вона залишається стабільною. Підвищення вмісту хлориду натрію до 50% у бетоні на всіх видах шлаку приводить до корозії арматури: втрата маси металу в часі збільшується.

Потенційні шляхи розв'язання проблеми

Наявність корозії арматури в лужному бетоні може бути підтверджена за допомогою електрохімічних досліджень, виконаних методом зняття анодних поляризованих кривих на зразках в розчині електроліту, який імітує водний розчин в порах бетону з добавкою корозійно-агресивної хлористої солі.

Обмеження негативного впливу іонів Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} на сталеву арматуру в лужному бетоні, отриманому із високорухливих бетонних сумішей, є можливим шляхом реалізації комплексу заходів – ущільнення структури бетону при використанні ефективних водоредуруючих добавок, запобігання впливу навколишнього середовища на арматуру при застосуванні інгібіторів корозії із контрольованим окисненням поверхні металу, хемосорбцією і включенням зазначених аніонів в склад первинних та вторинних гідратних новоутворень (нерозчинних лужних гідроалюмосилікатів) лужного цементу із створенням і підвищенням щільності захисного шару бетону.

Створення ефективного захисту бар'єрного типу є можливим із застосуванням лужних алюмосилікатних покриттів системи $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, спроможних у складі утворюваних цеолітоподібних новоутворень хімічно зв'язувати агресивні іони Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} та запобігати їх транспорту в напрямку сталевій арматури.

Вирішення проблеми запобігання корозії сталевій арматури в лужних бетонах при забезпеченні високих експлуатаційних властивостей може бути здійснено шляхом комплексного застосування ряду рецептурних та технологічних підходів, розроблених на основі поєднання наукових теорій і узагальнення практичного досвіду світової наукової спільноти. Зокрема, управління транспортними властивостями бетону щодо агресивних до сталевій арматури іонів передбачається шляхом їх зв'язування гідратними новоутвореннями з формуванням щільної мікроструктури лужного цементного каменю. Крім того, передбачається застосування хімічних модифікаторів, які посилюють адаптивну функцію структури лужних бетонів, забезпечують додатковий захист сталевій арматури і посилюють пасивуючий ефект дії лужного компоненту, як катодного інгібітору корозії. Визначення особливостей карбонізації лужного бетону і обґрунтування чинників цього процесу стане основою для розробки запобіжних методів протидії ризику депасивації сталевій арматури під дією вуглекислого газу. Оптимізація методів введення компонентів бетонної суміші та хімічних модифікаторів, виявлення доцільних параметрів приготування та укладання бетонної суміші, а також створення додаткового захисту поверхні лужного залізобетону лужними алюмосилікатними покриттями - є додатковими інструментами, що визначають новизну комплексного підходу до вирішення проблеми досліджень.

Висновки

Результати дослідження дозволять знайти дієве вирішення проблеми корозії арматури в бетоні та вдосконалити склад бетонної суміші для виготовлення залізобетонних конструкцій. При цьому вони спиратимуться на уже набутий практичний досвід у поєднанні з новими методами дослідження даної проблеми. Сформовані гіпотези дозволяють більш чітко бачити перспективу досягнення успіху під час проведення випробувань. Адже вони дають змогу розглядати проблему виникнення корозії з різних сторін і тим самим знаходити декілька шляхів її вирішення, в тому числі і комплексний підхід.

1. С. Н. Алексеев. Долговечность железобетона в агрессивных средах / С. Н. Алексеев, Ф. М. Иванов, С. Модры и др. – М.: Стройиздат, 1990. – 320 с.
2. Лучко Й. Й. Методи підвищення корозійної стійкості та довговічності бетонних та залізобетонних конструкцій і споруд / Й. Й. Лучко, І. І. Глагола, Б. Л. Назаревич // НАН України; Фіз.-мех. ін-т ім. Г. В. Карпенка: Каменяр, 1999. – 229 с.
3. Федосов С. В., Базанов С. М. Сульфатная коррозия бетона / С. В. Федосов, С. М. Базанов. – М: Изд-во АСВ, 2003. – 192 с.
4. Батраков В. Г. Применение химических добавок – способ первичной защиты железобетона / В. Г. Батраков, Е. С. Силина // Бетон и железобетон. – 1990. – № 3. – С. 11–12.
5. Глуховский В. Д. Щелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны / Под общ. ред. В. Д. Глуховского. – К.: Вища шк., 1979. – 232 с.
6. Глуховский В. Д. Щелочные вяжущие системы // Цемент. – 1990. – №6. – С. 3–8.
7. Кривенко П. В. Долговечность шлакощелочного бетона / П. В. Кривенко, К. К. Пушкарева. – К. : Будівельник, 1993. – 224 с.

1. S. N. Alekseev. Dolgovechnost zhelezobetona v agressivnyh sredah / S. N. Alekseev, F. M. Ivanov, S. Modry i dr. – М.: Strojizdat, 1990. – 320 s.
2. Luchko J. J. Metodi pidvishennya korozijnoyi stijkosti ta dovgovichnosti betonnih ta zalizobetonnih konstrukcij i sporud / J. J. Luchko, I. I. Glagola, B. L. Nazarevich // NAN Ukrayini; Fiz.-meh. in-t im. G. V. Karpenka: Kamenyar, 1999. – 229 s.
3. Fedosov S. V., Bazanov S. M. Sulfatnaya korroziya betona / S. V. Fedosov, S. M. Bazanov. – М: Izd-vo ASV, 2003. – 192 s.
4. Batrakov V. G. Primenenie himicheskikh dobavok – sposob pervichnoj zashity zhelezobetona / V. G. Batrakov, E. S. Silina // Beton i zhelezobeton. – 1990. – № 3. – S. 11–12.
5. Gluhovskij V. D. Shelochnye i shelочно-shelочноzemelnye gidravlicheskie vyazhushie i betony / Pod obsh. red. V. D. Gluhovskogo. – К.: Visha shk., 1979. – 232 s.
6. Gluhovskij V. D. Shelochnye vyazhushie sistemy // Cement. – 1990. – №6. – S. 3–8.
7. Krivenko P. V. Dolgovechnost shlakoshelochnogo betona / P. V. Krivenko, K. K. Pushkareva. – К. : Budivelnik, 1993. – 224 s.

olia.bojkoyt@gmail.com

НІЗДРВАТІ БЕТОНИ НА ОСНОВІ ТОНКОДИСПЕРСНИХ ВІДХОДІВ ГІРНИЧОЗБАГАЧУВАЛЬНИХ КОМБІНАТІВ

AHRATED CONCRETES BASED ON FINE WASTE PRODUCTS OF ORE MINING AND PROCESSING ENTERPRISES

Бондаренко С.В., к.т.н., доц. ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» / **Bondarenko S. V.**, *Ph.D., Assoc. Prof.* PHEI «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», ORCID ID, 0000-0001-9947-721X, **Бондаренко А.С.**, аспір. ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» / **Bondarenko A.S.**, *postgraduate student.* PHEI «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», ORCID ID 0000-0002-2241-1228

Анотація. В статті надано використання тонкодисперсної фракції (менше 0,16 мм) отриманої з відходів гірничозбагачувальних комбінатів, яка має високі фізико-механічні властивості. Вона може, використовуватись в якості заповнювача для ніздрюватих бетонів.

Результати проведених досліджень основних фізико-механічних властивостей ніздрюватих бетонів свідчать, що міцність неавтоклавного бетону з використанням тонкодисперсних відходів ГЗК на 10-30% вища в порівнянні з бетоном на кварцовому піску.

Summary: Fine fraction (less than 0,16 mm) that is manufactured from waste products of are mining and processing enterprises, has increased physical-mechanical properties. The purpose of the research was to identify the possibility of using magnetic enrichment wastes to produce cellular concretes, and to identify the effect of iron ore minerals in ferrous quartzite magnetic enrichment wastes on the properties of autoclave and non-autoclaved aerated concrete.

The presence of iron ore minerals in fine wastes did not significantly affect the physical composition of non-autoclaved aerated concrete. The increase in the strength of non-autoclaved aerated concrete is partly explained by the more developed surface of the waste, the improvement of contact with the binder.

Physicochemical studies have shown that during the curing of autoclaved aerated concrete using fine wastes of mining and processing enterprises, tumors have been found, the material composition of which is close to the products of hydration curing of cellular concrete on natural quartz sand.

The results of made investigations of basic physical-mechanical properties of gas-concrete indicate the fact that strength of unautoclave concrete based on

fine waste products of are mining and processing enterprises is 10..30 % higher in comparison with concretes based on natural quartz sand. The conducted researches proved the possibility of using the magnetic enrichment waste of ferrous quartzite - a fine fraction (less than 0.16mm) to obtain structural and heat-insulating autoclave and non-autoclaved aerated concrete.

Ключові слова: відходи, ніздрюваті бетони, відходи збагачення, дрібнодисперсні відходи, міцність на стиск, автоклавний і не автоклавний газобетон.

Waste products, aerated concretes, enrichment waste, finely divided waste, compressive strength, autoclaved and non-autoclaved aerated concrete.

Вступ. На гірничо-збагачувальних комбінатах (ГЗК) України, супутніми продуктами переробки руди в залізний концентрат, є відходи магнітного збагачення залістистих кварцитів, тонкодисперсна фракція (менше 0,16мм) і гірські породи які видобуваються супутньо. Ці матеріали за обсягом виробництва займають перше місце серед промислових відходів і їх потрібно розглядати як сировину по виробництву будівельних матеріалів і силікатних виробів широкої номенклатури [1].

Одним з напрямків використання тонкодисперсних відходів є застосування їх в якості сировини для виготовлення ніздрюватих бетонів. Визначальним фактором у виборі даного напрямку є зерновий склад, високий вміст кремнезему (65-70 %), велика питома поверхня, а також велика кількість тонкодисперсних відходів і необхідність їх утилізації [2].

В даний час технологія ніздрюватого бетону базується на застосуванні в якості кремнеземистого компонента меленого природного кварцового піску, що забезпечує повноту хімічних реакцій і підвищує кількість новоутворень, що впливає на міцність.

Помел кварцових пісків є однією з енергоємних і дорогих операцій, що впливає на вартість виробництва ніздрюватих бетонів. Застосування в якості основної сировини тонкодисперсних відходів ГЗК економічно більш вигідно, оскільки виключається помел вихідної силікатної сировини. Для отримання автоклавного і неавтоклавного газобетону застосовували тонкодисперсні відходи з питомою поверхнею 30,0 м²/л, негашене кальцієве вапно, портландцемент М 500, доменний гранульований шлак і алюмінієву пудру.

Основний матеріал. Метою досліджень було виявити можливість використання відходів магнітного збагачення для отримання ніздрюватих бетонів, та виявити вплив залізорудних мінералів у відходах магнітного збагачення залістистих кварцитів на властивості автоклавного і неавтоклавного газобетону.

Для досягнення цієї мети були виготовлені зразки газобетону з використанням тонкодисперсних відходів з загальним вмістом залізорудних мінералів в перерахунку на Fe загальне від 5 до 15 % і на меленому річковому піску (питома поверхня 30,0 м²/л) для порівняння.

Зразки газобетону запарювали в лабораторному автоклаві з автоматичним програмним регулюванням, з надлишковим тиском 0,8 МПа за режимом 3 + 8 + 3 ч. Пропарювання здійснювалося в камерах по режиму 4 + 10 + 4 ч при температурі ізотермічного прогріву 90 - 95 °С.

Експериментальні дані показують, що найбільш висока міцність на стиск 4,7-5,5 МПа середня щільність 730-780 кг/м³ отримана при вмісті в відходах залізорудних мінералів в перерахунку на елементарне залізо 6,0-8,5 %. Вміст залізорудних мінералів (Fe загальне) в кількості 11 % і більше знижує міцність газобетону в порівнянні з оптимальним значенням. Однак міцність газобетону і в цьому випадку на 18-37 % вище, ніж бетону на молотому кварцовому піску.

На гірничо-збагачувальних комбінатах ведуться роботи з глибокого збагачення залістих кварцитів, вміст залізорудних мінералів у відходах зменшується і наближається до оптимального, отриманого в наших дослідженнях.

Міцність неавтоклавної газобетону з використанням тонкодисперсних відходів ГЗК на 10-30 % вище в порівнянні з бетоном на піску; автоклавний газобетон на тонкодисперсних відходах має, більш високу міцність на стиск. Перевищення міцності становить 30-40 %.

Щоб визначити за рахунок чого підвищилась міцності бетону, були проведені комплексні дослідження автоклавного і неавтоклавного газобетону, що включають хімічний, рентгеноструктурний і диференційно-термічний аналізи.

Хімічним аналізом газобетону не виявлена істотна різниця в складі бетонів, які тужавили при різних температурно-вологих умовах. Виявилось, що підвищення міцності спостерігається в тих бетонах, в яких міститься найбільша кількість залізорудних мінералів. Виходячи з цього, а також з метою дослідження можливості використання тонкодисперсних відходів з підвищеним вмістом залізорудних мінералів для виробництва ніздрюватих бетонів, було проведено дослідження залежності міцності на стиск автоклавного і неавтоклавного газобетону від його фазового складу.

Рентгеноструктурний аналіз показав, що після пропарювання новоутворення в газобетоні представлені гідратом окису кальцію ($d = 0,489; 0,263; 0,192; 0,179$ нм) і вуглекислим кальцієм ($d = 0,386; 0,303; 0,249; 0,209; 0,187$ нм). Аналогічні новоутворення виявлені в широких межах також в бетоні, що містять залізорудні мінерали.

Рентгенограми неавтоклавного газобетону з використанням тонкодисперсних відходів гірничо-збагачувальних комбінатів з різним

вмістом залізородних мінералів, не відрізняються від рентгенограм газобетону на меленому кварцовому піску. Наведені дані показали, що наявність залізородних мінералів в тонкодисперсних відходах суттєво не позначилась на речовому складі неавтоклавної газобетону.

Підвищення міцності неавтоклавної газобетону частково пояснюється більш розвиненою поверхнею відходів, поліпшенням контактних зв'язків з в'язучим. У автоклавному газобетоні відсутній гідрат окису кальцію, а в досить значній кількості утворюється гідросилікат кальцію серії CSH(B) ($d = 0,303$ нм) і гідросилікат кальцію тоберморитової групи ($d = 1,13; 0,307; 0,297$ нм), вуглекислий кальцій ($d = 0,303; 0,249$ нм) і двоосновний гідросилікат $C_2SH(A)$ ($d = 0,355$ нм). Інших сполук ідентифікувати не вдалось.

Фізико-хімічні дослідження автоклавної газобетону показали, що в початковий період теплової обробки в присутності вільного вапна виникає $C_2SH(A)$, після чого основність новоутворень помітно знижується з подальшим утворенням волокнистих гідросилікатів серії CSH(B). Петрографічні дослідження показують, що стабільними новоутвореннями є тоберморит ($C_4S_5H_5$) та рідше CSH(A).

Гідросилікати, що виникають при автоклавної обробці газобетону на тонкодисперсних відходах ГЗК, мали основність від 0,9 до 1,9.

У роботах П.П. Буднікова, Н.П. Петрових, Ю.М. Бутт, Л.М. Рашковіча та інших було показано, що при гідротермальної обробці пористих бетонів з такою кількістю окису кальцію, яке зазвичай присутнє в силікатних виробках, в залежності від часу обробки виникають гідросилікати з основністю від 0,8 до 2.

Фізико-хімічними дослідженнями встановлено, що при твердінні автоклавної газобетону з використанням тонкодисперсних відходів гірничо-збагачувальних комбінатів виявлені новоутворення, речовинний склад яких близький продуктам гідратаційного твердіння ніздрюватого бетону на природному кварцовому піску.

Виходячи з цього, можливо зробити висновок, що в автоклавному газобетоні структурні грати утворюються в основному за рахунок гідросилікату CSH(B), тобермориту, ксонотліту і $C_2SH(A)$.

Рентгенограми автоклавної газобетону на кварцовому піску і з використанням тонкодисперсних відходів які містять залізородні мінерали в перерахунку на елементарне залізо від 5 до 15 % істотно не відрізняються; потрібно відзначити наявність гідросилікатів кальцію тоберморитової групи, вуглекислого кальцію, двоосновного гідросилікату і гідросилікату кальцію серії CSH(B).

Рентгеноструктурним аналізом і ДТА встановлено, що кількість низькоосновних гідросилікатів кальцію тоберморитової групи в газобетоні на тонкодисперсних відходах, що містять 5-8,5 % залізородних мінералів, в перерахунку на елементарне залізо зростає, а кількість двоосновного

гідросилікату зменшується, $C_2SH(A)$ знижує міцність на стиск автоклавних ніздрюватих бетонів.

Волокнисті гідросилікати в порівнянні з $C_2SH(A)$ мають більш високу міцність, що позитивно позначається на фізико-механічних показниках газобетону з застосуванням тонкодисперсних відходів ГЗК.

Порівняно низька міцність газобетону на тонкодисперсних відходах, що містять 11 % і більше залізорудних мінералів в перерахунку на елементарне залізо, пояснюється малою кількістю цементної зв'язки яка утворюється.

Однак, міцність і в цьому випадку залишається цілком достатньою, щоб говорити про застосування тонкодисперсних відходів для виробництва ніздрюватих бетонів.

Для вивчення впливу активуючих компонентів застосовували суміші з вмістом активних $CaO + MgO$ в кількості від 19 до 40 % при постійній середній щільності газобетону. В якості заповнювача використовували тонкодисперсні відходи з вмістом залізорудних мінералів (Fe загальне) в кількості 8 %.

Досліди показали, що залежність міцності газобетону від вмісту в суміші активних $CaO + MgO$ проходить через максимум. Спочатку міцність, з підвищенням вмісту активних $CaO + MgO$ в суміші, зростає, а при подальшому збільшенні до 33% і більше суттєво знижується.

При підвищенні активності суміші більше 41% виготовлення бетону стає неможливим через сильний розігрів маси і пароутворення.

Газобетон має відносно високу міцність на стиск при активності суміші 21-26 %, що відповідає вимогам, до конструкційно-теплоізоляційним бетонів.

Визначення вмісту вільного CaO в автоклавному газобетоні, показало, що при вмісті $CaO + MgO$ в суміші до 26% відбувається повне зв'язування вапна в новоутворення. При вмісті $CaO + MgO$ в суміші 28-40 % залишається частина вільного вапна в кількості 0,4 - 2,1 %, що і призводить до зниження міцності, з проявом структурних змін.

Висновки. Проведеними дослідженнями доведена можливість використання тонкодисперсних відходів магнітного збагачення залізистих кварцитів для отримання конструкційно-теплоізоляційного автоклавного і неавтоклавного ніздрюватих бетонів.

Наявність залізорудних мінералів в тонкодисперсних відходах суттєво не позначилась на речовому складі неавтоклавного газобетону. Підвищення міцності неавтоклавного газобетону частково пояснюється більш розвиненою поверхнею відходів, поліпшенням контактних зв'язків з в'язучим.

Фізико-хімічними дослідженнями встановлено, що при твердінні автоклавного газобетону з використанням тонкодисперсних відходів виявлені новоутворення, речовинний склад яких близький до продуктів гідратаційного твердіння ніздрюватого бетону на природному кварцовому піску.

Рентгенограми автоклавного газобетону на кварцовому піску і з використанням тонкодисперсних відходів, що містять залізорудні мінерали істотно не відрізняються.

Газобетон з використанням тонкодисперсних відходів має відносно високу міцність на стиск при активності суміші 21-26 %, що відповідає вимогам, до конструкційно-теплоізоляційним бетонів.

1. Большаков В.И., Бондаренко С.В./Отходы горно-обогатительных комбинатов и их использование в строительстве – Днепропетровск:1999.–96с.
2. Бондаренко С.В., Моисеенко В.В., Бондаренко Г.Н. Комплексное использование минерально-сырьевых ресурсов горно-обогатительных комбинатов Украины // Вопросы химии и химической технологии (научно-технический журнал).-Вип.5-Днепропетровск: УГХТУ, 2003. - 29-32 с.

1. Bolshakov V.I., Bondarenko S.V. / Othodyi gorno-obogatitelnyh kombinatov i ih ispolzovanie v stroitelstve // Dnepropetrovsk PGASA. -1999. - s. 96.
2. Bondarenko S. V., Moiseenko V.V., Bondarenko S. V. /Kompleksnoe ispolzovanie mineralno-syirevyih resursov gorno-obogatitelnyih kombinatov Ukrainyi // Voprosyi himii I himicheskoy tehnologiyi (nauchno-tehnicheskij zhurnal). Vip. 5 – Dnepropetrovsk: UGHTU, 2003. - 29-32s.

УДК 691.328

РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВІ БЕТОНИ АРМОВАНІ СІТКАМИ – АНАЛОГАМИ ДИСПЕРСНОЇ АРМАТУРИ

REACTIVE POWDER CONCRETE WITH DISPERSED STEEL MESH REINFORCEMENT

Бордюженко О.М., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Bordiuzhenko O., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-3686-5121, Dvorkin L., doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318 (National University of Water and Environmental Engineering, Rivne)

Наведено результати досліджень деформативних властивостей реакційно-порошкових бетонів з армуванням сталевими сітками, що виступають в ролі упорядковано розташованої дисперсної арматури. Встановлено, що дисперсне армування реакційно-порошкових бетонів сталевими сітками дозволяє суттєво покращити їх деформаційні властивості або при тих же значеннях суттєво знизити витрати сталі у бетонних виробих і конструкціях.

Reactive powder fiber-reinforced concrete has sufficiently high boundary deformation properties. However, a further increase in these properties is difficult. This is explained by the complexity of the oriented arrangement of the steel fiber in the concrete array in parallel with the tensile stress and by the inability of individual fibers to work together.

Increasing the values of the deformative properties of concrete, such as the tensile strength and the ultimate deformation of concrete can be achieved by using as a disperse reinforcing component, steel meshes, which are placed in the concrete perpendicular to the acting load (parallel to the tensile stress).

Steel meshes in the mass of concrete act as analogues of fiber, but, in contrast, have two significant advantages: they allow the joint operation of the entire volume of steel under stresses and are also characterized by the correct orientation relative to the existing external load. As a result, it is possible to significantly increase the tensile strength of concrete and increase its plastic deformation.

Disperse reinforcement of reactive powder concrete with steel meshes can significantly improve their deformation properties, or at the same values

significantly reduce the consumption of steel in concrete products and structures. Due to the above, a significant economic effect can be achieved. This method of dispersion reinforcement allows to increase plastic deformation of reactive powder concrete by almost 5 times.

Ключові слова:

Реакційно-порошковий бетон, дисперсне армування, сталеві сітки, фібра, деформативність.

Reactive powder concrete, dispersed reinforcement, steel meshes, fiber, deformability.

Вступ. Аналіз досліджень. Деформативність будівельних матеріалів, зокрема бетонів, їх здатність чинити опір механічним впливам значною мірою залежать від границі міцності на розтяг при згині. Для бетонних та залізобетонних конструкцій цей показник, а також можливість сприймати навантаження без втрати несучої здатності можуть забезпечуватися різними способами, що ґрунтуються на збільшенні деформативно-пластичних властивостей.

Відомі різні способи підвищення деформативності бетонів. Одним із способів підвищення деформативних властивостей бетонів є просочування бетонів різними полімерними речовинами [1] або введення їх в бетонні суміші [2-3]. Утворені таким чином бетонополімери або полімерцементи характеризуються збільшеними у порівнянні із вихідним бетоном значеннями міцності на розтяг при згині в 2...3 рази та відповідно збільшеними граничними деформаціями. Однак, недоліком даного способу є складність технології, пов'язана з необхідністю попереднього висушування затверділого бетону та подальшого його просочування (бажано при вакуумуванні) протягом декількох годин полімерними розчинами або мономерами, які в подальшому полімеризуються. Крім того, суттєво зменшується термічна стійкість таких бетонів.

Також загальновідомим способом підвищення деформативних властивостей бетону є введення до його складу сталевої фібри в кількості 100...300 кг/м³ [4]. За рахунок цього міцність на розтяг при згині утворюваних таким чином фіробетонів збільшується в 3...4 рази і досягає значень 15...18 МПа, а відносні граничні деформації зростають в 2...3 рази (до 10...15·10⁻⁴). Недоліком цього способу є складність орієнтованого розташування сталевої фібри в масиві бетону паралельно виникаючим розтягуючим напруженням та неможливості забезпечення спільної роботи окремих волокон. Це призводить до неефективного використання у повній мірі всієї маси фібри і, як наслідок, потенційної втрати можливості збільшення значень деформативних властивостей, зокрема пластичних деформацій.

Додаткового збільшення деформативних властивостей бетону для отримання матеріалу із підвищеними деформативними властивостями можна досягнути, в так званих "реакційно-порошкових фібробетонах". Для таких фібробетонів характерним є використання бетонної матриці з максимальною крупністю заповнювачів 1,25 мм та сталеві фібри у кількості 150...200 кг/м³ [5]. За рахунок використання тонкодисперсних заповнювачів в даному способі вдається досягти більшої однорідності бетонної матриці, що приводить до збільшення міцності на розтяг при згині до 20...25 МПа та значень граничних деформацій до $15 \cdot 10^{-4}$.

Проте для РПФБ досягнення високих значень граничних деформацій ускладнюється необхідністю орієнтованого розташування сталеві фібри в масиві бетону паралельно виникаючим розтягуючим напруженням та неможливістю забезпечення спільної роботи окремих волокон.

Збільшення значень деформативних властивостей бетону, а саме границі міцності на розтяг при згині та граничних деформацій бетону можна досягнути, якщо використовувати в якості армуючого компонента, сталеві сітки, які розташовують в бетоні перпендикулярно діючим навантаженням (паралельно виникаючим розтягуючим напруженням). Сталеві сітки можна розглядати як аналог упорядковано розташованої дисперсної арматури.

Результати досліджень. Запропоноване рішення здійснювали наступним чином. Використовували реакційно-порошковий бетон наступного складу, кг/м³: портландцемент ПЦ 500 І – 700; мелений пісок ($S_{\text{пнт}} = 250 \text{ кг/м}^2$) - 360; пісок (0,16...1,25 мм) - 1130; СП Dynamon SP3 – 1,5%. В/Ц суміші склав 0,28, рухомість 25 см.

В якості дисперсного армуючого компонента (аналога фібри) використовували сталеві сітки, виготовлені із сталі Ст.3 із квадратними комітками діаметром стержнів 0,8 мм та кроком 10 мм. У форму для зразка розміром 16×9×4 см укладали ряд сіток з відстанями між ними 4 мм. Далі виготовляли бетонну суміш для реакційно-порошкового бетону класу В80 і укладали її у форму. Заформований зразок твердів в нормальних умовах протягом 28 діб. Після цього зразок піддавали випробуванню на розтяг при згині за трьохточковою схемою, при цьому також будувалась діаграма навантаження – деформація. На рис. 1 представлена така діаграма у випадку використання 10 сіток.

Як видно, на діаграмі спостерігається суттєво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації (прогину). Очевидно, це свідчить про наявність високих деформативно-пластичних властивостей у випробуваного зразка.

Для оцінки отриманого результату було виготовлено зразки аналогічних розмірів на РПБ та дрібнозернистому бетоні а також з різним вмістом сіток і сталеві фібри (табл. 1).

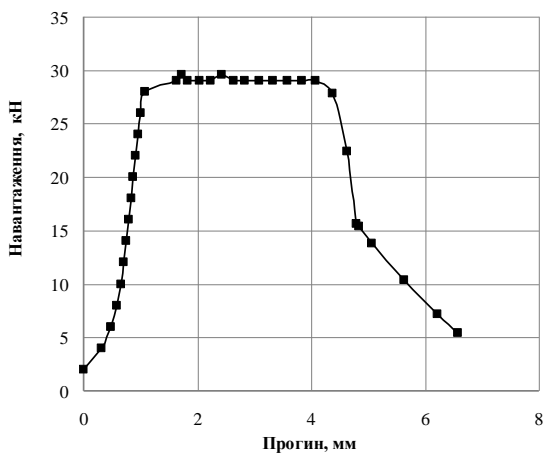


Рис. 1. Діаграма навантаження-деформація для зразка РПБ з 10 сітками

Таблиця 1

Сітчасте та дисперсне армування досліджуваних зразків

Зразки (маркування)	РПБ	ДЗБ	С-3	С-5	С-10	Ф	ФД	С-5Ф
Бетон (матриця)*	РПБ	ДЗБ	РПБ	РПБ	РПБ	РПБ	ДЗБ	РПБ
К-сть сіток	—	—	3	5	10	—	—	5
Вміст сталі сіток, кг/м ³	—	—	46	70	140	—	—	—
Вміст сталеві фібри, кг/м ³	—	—	—	—	—	140	140	70

* ДЗБ – дрібнозернистий бетон; РПБ – реакційно-порошковий бетон

Як показали результати випробувань, зразки без дисперсної арматури (рис. 2) показали досить низькі значення граничних деформацій (близько 0,6 мм, з деякою перевагою реакційно-порошкового бетону). Характер руйнування – крихкий, що відображено майже прямими лініями на діаграмі та спостерігалось візуально під час випробування.

Введення до складу реакційно-порошкового та дрібнозернистого бетонів сталеві фібри приводить до очікуваного зростання міцності на розтяг при згині, але головне – з'являються низхідні гілки на кривих деформацій (рис. 3). Це свідчить про покращення деформативних властивостей бетонів за рахунок дисперсного армування фіброю.

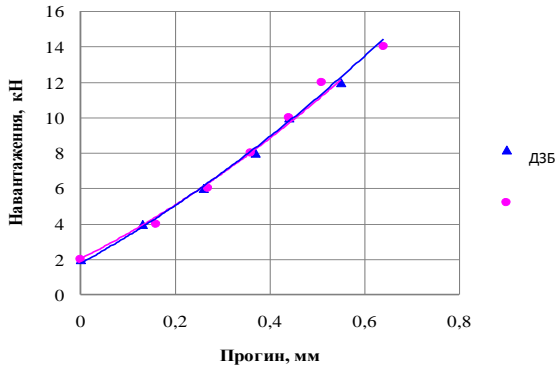


Рис. 2. Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового бетону

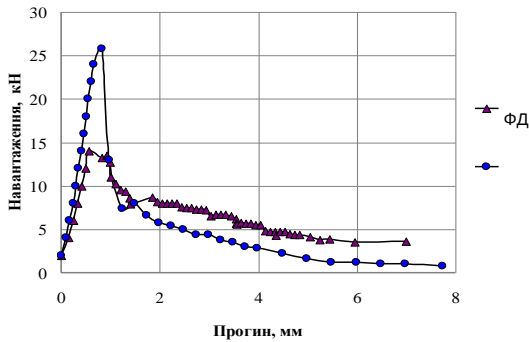


Рис. 3. Діаграма навантаження-деформація для зразків з дрібнозернистого та реакційно-порошкового фібробетону

Найкращі результати в плані забезпечення високих деформативних властивостей бетонів показали зразки, що містили в собі дисперсну арматуру у вигляді сіток. Максимальне руйнуюче навантаження зафіксовано у зразка, що містив 10 сіток і для нього ж характерне яскраво виражене "плато" сталості навантаження при постійному зростанні деформації (рис. 4). Також достатньо хороші результати продемонстрував зразок із 5-ма сітками та фібрую (зразок С-5Ф). Для нього зафіксоване значення міцності на розтяг при згині навіть вище ніж у зразка з 10-ма сітками (С-10), в той же час низхідні гілки деформацій на діаграмі суттєво відрізняється, не на користь варіанту комбінованого армування. Також відмінним є і характер руйнування. Зразок С-10 після випробування зовні виглядає найменш зруйнованим (рис. 5).

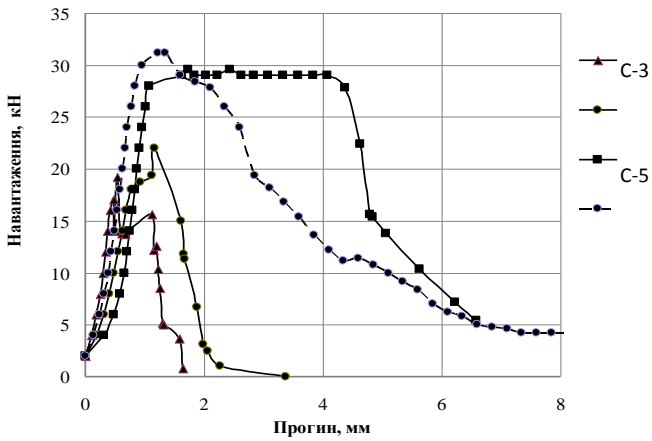


Рис. 4. Діаграма навантаження-деформація для зразків РПБ з різним вмістом сіток



Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків після випробування (маркування зразків відповідно до табл. 1)

Позитивний ефект збільшення деформативності бетону завдяки використанню сталевих сіток в якості дисперсної арматури досягається наступним чином. Сталеві сітки у масі бетону виступають аналогами фібри але, на відміну від неї, мають дві суттєві переваги: забезпечують можливість спільної роботи всього об'єму сталі при виникаючих напруженнях а також характеризуються правильною орієнтацією відносно діючим зовнішнім навантаженням. В результаті стає можливим суттєво підвищити міцність на розтяг при згині бетону та збільшити його пластичні деформації.

За результатами додаткових досліджень встановлено, що оптимальними параметрами дисперсного армування сітками є наступні: діаметр стержнів сітки 0,8...1,2 мм; крок сітки 10...15 мм; відстань між окремими сітками 3...10 мм; вміст сіток в бетоні (за масою) 75...200 кг/м³.

Діаметр стержнів сіток приймається аналогічно до найбільш поширених діаметрів сталеві фібри. При діаметрі менше 0,8 мм необхідно збільшувати кількість сіток в перерізі виробу або конструкції, а при діаметрі понад 1,2 мм – збільшується загальна витрата сталі на об'єм бетону. Зменшення кроку сітки менше 10 мм збільшує витрату сталі і ускладнює процес формування виробу, а збільшення понад 15 мм знижує ефективність роботи армуючого компонента.

Зменшення відстані між окремими сітками менше 3 мм ускладнює процес їх фіксації в опалубці або формі, а також погіршує рівномірність розподілу бетонної суміші. Збільшення відстані понад 10 мм приводить до появи ефекту "шаруватості" конструкції або виробу, що погіршує деформативні властивості.

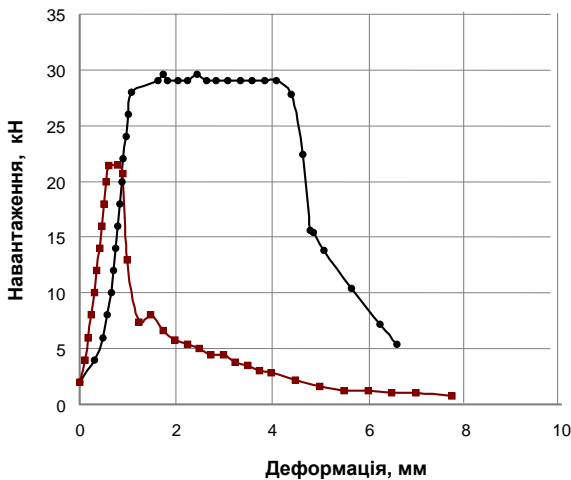


Рис. 6. Діаграма навантаження-деформація
 1 – реакційно-порошковий бетон з 10 сітками;
 2 – реакційно-порошковий фібробетон

Вміст сіток за масою приймається відповідно до найбільш поширених витрат сталеві фібри в бетоні. Зменшення вмісту нижче 75 кг/м^3 не забезпечує необхідних значень деформативних властивостей, а збільшення понад 200 кг/м^3 приводить до суттєвого зростання вартості конструкції без відповідного збільшення деформативності.

Для виявлення ефективності дисперсного армування сітками порівняємо результати випробування зразка С-10 з 10 сітками і аналогічного за складом бетону зразком Ф з витратою фібри 140 кг/м^3 , що відповідала витраті сталі в зразку С-10.

Як видно з наведеної нижче діаграми (рис. 6), зразок С-10 має міцність на розтяг при згині 32 МПа, що на 30% більше ніж у зразка, виготовленого із використанням фібри (25 МПа). Крім того, суттєво збільшуються пластичні деформації, що зростають майже в 5 раз ($4...4,5 \text{ мм}$ проти $0,5...1 \text{ мм}$), що відображено на діаграмі навантаження-деформація.

Висновки

Дисперсне армування реакційно-порошкових бетонів металевими сітками з визначеними параметрами дозволяє суттєво покращити їх деформаційні властивості, або при тих же значеннях суттєво знизити витрати сталі у бетонних виробках і конструкціях. За рахунок вищесказаного може досягатися значний економічний ефект. Також стає можливим конструкції із таких бетонів застосовувати у відповідальних спорудах, що піддаються значним навантаженням.

1. Баженов Ю.М. Бетонополимеры. М.: Стройиздат, 1983. – 472 с.
Vazhenov Yu.M. Betonopolimery. M.: Strojizdat, 1983. – 472 s.
2. Саталкин А.В., Солнцева В.А. Цементно-полимерные бетоны. – М.: Стройиздат, 1971. – 223 с.
Satalkin A.V., Solnceva V.A. Cementno-polimernye betony. – M.: Strojizdat, 1971. – 223 s.
3. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. – СПб.: Строй Бетон, 2006. 692 с.
Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Osnovy betonovedeniya. – SPb.: Stroj Beton, 2006. 692 s.
4. Рабинович Ф.Н. Композиты на основе дисперсноармированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография / Ф.Н. Рабинович. – М.: Издательство АСВ, – 2004. – 201 с.
Rabinovich F.N. Kompozity na osnove dispersnoarmirovannyh betonov. Voprosy teorii i proektirovaniya, tehnologiya, konstrukcii: Monografiya / F.N. Rabinovich. – M.: Izdatelstvo ASV, – 2004. – 201 s.
5. Ресурсосберегающие порошковые фибробетоны с использованием техногенных отходов / В.И.Калашников, В.С.Демьянова, В.М.Володин, А.Д.Гусев // *Строительные материалы*. – 2012, №8. – С. 52–54.
Resursosberegayushie poroshkovye fibrobetony s ispolzovaniem tehnogennyh othodov / V.I.Kalashnikov, V.S.Demyanova, V.M.Volodin, A.D.Gusev // *Stroitelnyye materialy*. – 2012, №8. – S.52–54.

УДК 691.32/34

МЕХАНИЗМЫ МНОГООЧАГОВОГО СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОМПОЗИТОВ

МЕХАНИЗМИ БАГАТООСЕРЕДКОВОГО СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТИВ

MECHANISMS OF MULTI-CENTRE STRUCTURE FORMATION OF BUILDING COMPOSITES

Выровой В.Н., д.т.н., проф., **Коробко О.А.**, д.т.н., доц., **Суханов В.Г.**, д.т.н., проф., **Закорчемный Ю.О.**, к.т.н., доц. (Одесская государственная академия строительства и архитектуры, г. Одесса), **Елькин А.В.**, к.т.н. (КП «БУДОВА», г. Одесса)

Вировой В.М., д.т.н., проф., **Коробко О.О.**, д.т.н., доц., **Суханов В.Г.**, д.т.н., проф., **Закорчемний Ю.О.**, к.т.н., доц. (Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса), **Єлькін О.В.**, к.т.н. (КП «БУДОВА», м. Одеса)

Vyrovoy V.M., doctor of technical sciences, professor, **Korobko O. O.**, doctor of technical sciences, docent, **Sukhanov V.G.**, doctor of technical sciences, professor, **Zakorchemny Yu. O.**, candidate of technical sciences, docent (Odessa State Academy Civil Engineering and Architecture, Odessa). **Ielkin O. V.**, candidate of technical sciences (KP «BUDOVA», Odessa)

В работе предложены модели объективных процессов спонтанного возникновения в сложноорганизованных материалах локальных центров структурообразования. Многоочаговое структурообразование ведет к разнообразию структур на различных уровнях неоднородностей, что гарантирует стойкость изделий при внешних воздействиях.

У роботі запропоновані моделі об'єктивних процесів спонтанного виникнення у складноорганізованих матеріалах локальних центрів структуроутворення. Багатоосередкове структуроутворення веде до різноманіття структур на різних рівнях неоднорідностей, що гарантує стійкість виробів при зовнішніх впливах.

The required operational characteristics of building composites can be ensured by the directed organization of their structure, taking into account the multiplicity occurrence of local centres of structure formation. Multi-

centre structure formation is the process of spontaneous emergence in the material of structure-forming centres around which localized structures with individual for each such structure, qualitative and quantitative compositions. Realization of various mechanisms of multi- centre structure formation leads to a unique combination of certain repeatability of discrete structures of each level with absolute non-repeatability of shapes, sizes, orientation, qualitative and quantitative compositions of different-sized fragments. Multi-centre structure formation of building composites provides a reserve of the diversity of their structures at various levels of heterogeneities. This sets the conditions for favourable structural changes that guarantee the resistance of the products under external influences. To obtain the required reserve of structures, depending on specific operating conditions, an important problem is to identify control factors of a multi-centre organization of the structure of composite building materials. The multi-centre formation of initial structure determines the occurrence of cracks with individual characteristics interconnected into a single network. The combination of non-repeating cracks and inner surfaces of partition allows the positive effect of structural diversity to appear during the operation of the product. Therefore, the regulation of the multi-centre of organization of the structure creates the prerequisites for providing such a network of cracks and inner surfaces of partition, which will reduce the dangerous stresses and deformations that arise in the material. This was confirmed by experimental studies to determine the resistance of concrete and expanded clay concrete at periodic of freezing-thawing and wetting-drying cycles.

Ключевые слова: Многоочаговое структурообразование, самоорганизация, неоднородности, внутренние поверхности раздела.

Багатоосередкове структуроутворення, самоорганізація, неоднорідності, внутрішні поверхні розділу.

Multi-centre structure formation, self-organization, heterogeneities, inner surfaces of partition.

Введение. Для идентификации различных сложноорганизованных объектов и оценки свойств недостаточно ограничиваться только знанием об их качественном и количественном составах. Необходимо знать организацию структуры, ее своеобразный «дизайн», который неповторимым для каждого объекта. Поэтому наиболее актуальным и насущным вопросом является следующий: «как, когда и почему возникают локальные и интегральные структуры строительных композиционных материалов и изделий?».

Разноплановые исследования многих поколений ученых, инженеров и технологов, проведенные в рамках действующей парадигмы [1, 2, 3], позволили установить несомненное присутствие капилляров, пор и трещин в

различных по природе и назначению строительных материалах. В то же время, указанные элементы не фигурируют в качестве исходных компонентов при подборе составов материала, а самопроизвольно возникают в период его получения и становления. Поэтому капилляры, поры и трещины следует отнести к элементам, которые ведут к неслучайному образованию в изначально непрерывной среде локальных несплошностей, и сами по себе являются равноправными элементами структуры.

Анализ последних исследований. В специальной литературе в достаточной мере аргументировано раскрыты причины возникновения капилляров и трещин, разработаны рецептурно-технологические приемы и способы изменения количественных и качественных показателей капиллярно-пористой структуры [4, 5]. Показано влияние составов вяжущих, добавок, режимов приготовления смесей, изготовления изделий и др. на формирование капиллярно-пористой структуры, которая определяет свойства материалов [6]. Раскрыты химические, физико-химические, физические и механические процессы и явления, которые ведут к образованию в непрерывной среде локальных дискретных элементов. К этому авторитетному перечню следует добавить, на наш взгляд, многоочаговое структурообразование как один из вероятных механизмов, благодаря которому возникновение новых для системы элементов в виде поверхностей раздела (поры, капилляры, трещины) не является случайным. Многоочаговое структурообразование является самым начальным процессом организации структур материалов, независимо от их природы и назначения, выступая необходимой предпосылкой проявления процессов и явлений при гидратации, полимеризации, сушке, твердении расплавов и т.д. Таким образом, для получения ответа на вопрос «как, когда и почему в исходных непрерывных смесях возникают локализованные структуры и внутренние поверхности раздела?» необходимо учитывать все этапы эволюционных переходов. Это даст возможность определить факторы управления солидарным множеством очаговых центров в полиструктурных материалах, которые структурно связаны между собой условиями своего возникновения и путями развития.

Постановка цели и задач исследований. Исходя из вышеизложенного, была определена цель исследований – обеспечение требуемых эксплуатационных характеристик строительных композитов за счет направленной организации их структуры с учетом многоочаговости возникновения локальных центров структурообразования. Одной из важных задач для достижения поставленной цели следует считать анализ механизмов самопроизвольного образования в непрерывной среде внутренних

поверхностей в виде пор, капилляров и трещин, что позволит определить факторы управления структурой и свойствами полиструктурных материалов.

Методика исследований. В качестве объектов анализа приняты композиционные строительные материалы полиструктурного строения. Все разнообразие строительных композитов и изделий относится к полиструктурным объектам, организованным по принципу «структура в структуре» или «композит в композите» [7]. Полиструктурность предполагает, что на каждом уровне неоднородностей реализуется свой механизм организации структуры, характерный именно для этого уровня, при обязательном учете эффектов взаимодействия и взаимовлияния различных уровней между собой.

Базовым методом анализа является метод многоочагового структурообразования строительных композитов. Под многоочаговым структурообразованием понимается процесс самопроизвольного возникновения в материале структурообразующих очагов (центров), вокруг которых образуются локализованные структуры с индивидуальным для каждой такой структуры качественным и количественным составами. Образование локальных структур неизбежно ведет к зарождению и развитию новых для системы элементов структуры – поверхностей раздела, способных вырождаться в поры, капилляры и берега трещин. Образование внутренних поверхностей раздела завершает начальный этап эволюционного процесса становления структуры в непрерывном материале и устанавливает новые условия формирования фрагментарно-мозаичных структур на каждом уровне неоднородностей. При этом единого механизма многоочагового структурообразования не существует. Для каждого уровня структурных неоднородностей реализуется характерный только для этой неоднородности механизм образования локализованных структур.

Результаты исследований. Для бетона можно выделить следующие уровни структурных неоднородностей: микроструктура с доминирующим механизмом структурообразования за счет межчастичных взаимодействий, макроструктура, которая формируется при взаимодействии матричного материала с заполнителями, и уровень изделия или конструкции, геометрические характеристики которых влияют на распределение начальных деформаций. Становление бетона как конструктивно оформленной целостности происходит в результате многоочаговых процессов организации структуры на каждом уровне неоднородностей. Структурообразующие центры индивидуальны для каждого уровня, но все обеспечивают образование локальных структур с неповторимыми параметрами.

Каждый уровень включает набор характерных только для него элементов структуры: кластеры из частиц вяжущего и продуктов новой фазы на микроуровне, упорядоченные ячейки, произвольно образованные группами заполнителей в матричном материале, на макроуровне, и непосредственно само изделие (конструкция) на уровне изделия (конструкции). Это позволяет принять в качестве управляющих факторов изменение соотношений размеров, количества и природы исходных частиц вяжущего (наполнителей), соотношение адгезионно-когезионных сил связи между матрицей и поверхностью заполнителей, геометрические характеристики изделия.

Проведенные исследования показали, что изменение качественных и количественных параметров частиц вяжущего или наполнителей позволяет управлять условиями формирования многоочаговой структуры на уровне неоднородности «дисперсная фаза – дисперсионная среда» для увеличения разнообразия возникающих кластерных структур, неповторяемых по форме, размерам и составам. Это, в свою очередь, ведет к нарастанию несхожести структурных агрегатов на уровне продуктов новообразований, что отражается на кинетике объемных деформаций и сроках схватывания твердеющего материала.

Направлено организовывать структуры на микроуровне можно путем внутренней, внешней и комплексной активации, в частности за счет использования рациональных наполнителей и специальных матриц, преобразующих внешние электромагнитные поля [8]. Принятые виды активации позволили изменить условия структурообразования, что привело к изменению величины и кинетики объемных деформаций твердеющих композиций до 2,5-3 раз, а периодов формирования структуры до 120 мин. В результате было достигнуто повышение трещиностойкости до 2 раз, прочности при сжатии до 39% и прочности при изгибе в 2,2 раза.

Анализ структуры бетонов различных составов, видов и назначения показал, что в каждом бетоне присутствуют структурные ячейки с разными расстояниями между заполнителями и способами их укладки. Поэтому каждую такую структурную ячейку следует рассматривать как очаг индивидуального структурного оформления. Экспериментальные результаты показали несовпадение значений объемных деформаций и периодов структурообразования твердеющей матрицы в отдельных ячейках бетона. При различных способах укладки и ориентирования заполнителей показатели начальных объемных деформаций цементной матрицы изменились на 7-44%, сроки схватывания на 20-150 мин. Поврежденность цементной матрицы в образцах с различными наборами ячеек отличалась до 45%, величина водопоглощения до 45%, прочность при сжатии до 2 раз. Еще одним фактором регулирования структурного разнообразия, а, значит, и многоочаговости структурообразования является изменение соотношения адгезионно-когезионных сил связи на границе раздела между матричной

составляющей и заполнителями. Бетоны с многовариантным набором ячеек, по сравнению с бетонами традиционных составов, имели меньший объем открытых капиллярных пор и повышенные показатели прочности при сжатии, на 20%, и модуля упругости, до 15%. Значения поврежденности бетонов в зависимости от разнообразия их структур отличались на 25-40%. Причем, при разрушении образцов, благодаря более развитой сети начальных трещин, протяженность магистральной трещины была на 18% меньше в бетонах с избирательной адгезией матрицы к заполнителям, т.е. тех бетонов, которые включали более сложный набор структурных ячеек.

Изменение геометрии изделий усугубляет неповторимость распределения локальных и интегральных начальных деформаций, выступающих очагами структурообразования бетона на уровне изделия. Регулирование условий многоочаговости организации структуры за счет проектирования формы мелкоштучных изделий и бетонных балок позволило уменьшить градиенты полей остаточных деформаций и, тем самым, повысить их механические и деформативные свойства. Экспериментальные результаты показали, что изменение условий формирования полей технологических деформаций за счет изменения формы одной из граней балки привело к самопроизвольному изменению плотности материала до 190 кг/м^3 , прочности при сжатии до 30%, снижению водопоглощения до 20% по сечению изделия. Поврежденность материала изменилась до 5% по сечению балки. Структурные особенности бетона предопределяют конкретные места зарождения и микротраекторию развития эксплуатационных трещин. В зависимости от вида трещин разрушения и геометрии конструкций, поврежденность материала после разрушения балок отличалась более чем на 12%.

Реализация различных механизмов многоочагового структурообразования ведет к организации многомерной структуры изделия. Это проявляется в своеобразном сочетании определенной повторяемости дискретных структур каждого уровня с абсолютной неповторяемостью форм, размеров, ориентирования, качественного и количественного составов разноразмерных фрагментов. Происходит своеобразное обобщение несочетаемых по качественным признакам элементов в объеме материала одного изделия. Можно заключить, что неотвратимо действует один из основных холистических принципов – все в структуре изделия взаимосвязано со всем за счет того, что на каждом уровне и между уровнями сосуществуют свои обратные связи.

Образование разномасштабных фрагментов завершает начальный путь структурной организации и предвосхищает дальнейшие процессы структурной организации с учетом возникновения в системе новых разноуровневых поверхностей раздела. Эволюционный путь предполагает проводить дальнейший анализ поведения системы «от достигнутого». Исходный состав материала и технологические режимы производства

изделий оказали самое существенное влияние на образование разнородных относительно независимых частей – фрагментов. Появление фрагментов неизбежно привело к возникновению и перспективе развития внутренних поверхностей раздела, которые предопределяют последующие эволюционные преобразования структур.

Образование множества локальных структур на различных уровнях неоднородностей вследствие многоочаговости структурообразования создает условия для появления новых элементов структуры в виде разветвленной сети разнородных поверхностей раздела. Последние, при объемных изменениях твердеющего материала, развиваются в трещины, которые имеют постоянную тенденцию трансформироваться во внутренние поверхности раздела. Общая сеть трещин и внутренних поверхностей раздела как активных элементов определяет потенциал структуры и безопасность функционирования изделия или конструкции [7].

Многоочаговость становления начальной структуры обуславливает разнообразие по составу и другим параметрам структурных блоков на микро- и макроуровне, что предопределяет возникновение трещин с индивидуальными характеристиками, взаимосвязанных в единую сеть. Именно сочетание неповторяемых по протяженности, рельефу берегов и количеству в локальных объемах трещин и внутренних поверхностей раздела позволяет проявиться положительному эффекту структурного разнообразия в период эксплуатации изделия. Для поддержки уровня свойств происходит спонтанная адаптация структуры к внешним и внутренним воздействиям. Это проявляется как своевременное изменение параметров активных элементов. Благодаря взаимосвязанности множества структур бетона, градиенты возникающих деформаций могут возвратно передаваться с одного уровня на другой и перераспределяться между ними. Самосохранение неоднородностей обеспечивается локализацией роста трещин внутри неоднородностей, что предотвращается их слияние в трещины разрушения. Поэтому регулирование многоочаговости организации структуры создает предпосылки для обеспечения такой сети трещин и внутренних поверхностей раздела, которая будет релаксировать опасные напряжения и деформации, возникающие в материале. Это подтвердилось исследованиями по определению стойкости бетонов на плотных и легких заполнителях при периодических циклах замораживания-оттаивания и увлажнения-высушивания. Регулирование разнообразия центров структурообразования привело к получению структур с сетью активных элементов, которые обеспечили адекватность проявления структурных изменений под действием температурных и влажностных факторов, что позволило сохранить проектные показатели свойств бетонов.

Выводы. Проведенный анализ позволил установить, что многоочаговое структурообразование является объективно существующим феноменом

образования структур композиционных строительных материалов. В свою очередь, анализ механизмов многоочагового структурообразования показал, что принципиально различные механизмы приводят к самопроизвольному возникновению новых для каждого уровня неоднородностей элементов – внутренних поверхностей раздела. Дальнейшие процессы эволюционных преобразований структуры материала и изделий определяются условиями трансформации возникших поверхностей раздела в поры, капилляры и трещины. Многоочаговость структурообразования строительных композитов обеспечивает резерв разнообразия их структур на различных уровнях неоднородностей. Этим задаются условия для благоприятных структурных изменений, что гарантирует стойкость изделий при внешних воздействиях.

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : АСВ, 2002. 500 с.
2. Кривенко П.В., Пушкарёва Е.К., Гоц В.И., Ковальчук Г.Ю. Цементы и бетоны на основе топливных зол и шлаков. Киев : Экспересс-Полиграф, 2012. 258 с.
3. Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. К. : Будівельник, 1991. 136 с.
4. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.Є. Модифіковані композиційні цементі. Львів : НУ «Львівська політехніка», 2010. 130 с.
5. Дворкін Л.І., Бабич Є.М., Житковський В.В. та ін. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони. Рівне : НУВГП, 2017. 331 с.
6. Штарк Й., Вишт Б. Цемент и известь. Киев, 2008. 470 с.
7. Суханов В.Г., Выровой В.Н., Коробко О.А. Структура материала в структуре конструкции. Одесса : ПОЛИГРАФ, 2016. 244 с.
8. Ткаченко Г.Г., Казмирчук Н.В., Выровой В.Н., Бородулин С.Д. Влияние активации на изменение свойств твердеющих и затвердевших цементных композиций // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2006. Вип. 20. С. 351-354.

1. Баженов Ю. М. Технология бетона. М. : АСВ, 2002. 500 с.
2. Krivenko P.V., Pushkar'ova E.K., Goc V.I., Koval'chuk G.YU. Cementy i betony na osnovе toplivnyh zol i shlakov. Kiev : Eksperess-Poligraf, 2012. 258 s.
3. Dvorkin L.I., Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Chudnovskij S.M. Cementnye betony s mineral'nymi napolnitelyami. K. : Budivelnik, 1991. 136 s.
4. Sanytskyi M.A., Sobol Kh.S., Markiv T.Ie. Modyfikovani kompozitsiini tsementy. Lviv: NU «Lvivska politekhnikha», 2010. 130 s.
5. Dvorkin L.I., Babych Ye.M., Zhytkovskyi V.V. та in. Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony та fibrobetony. Rivne : NUVHP, 2017. 331 s.
6. SHtark J., Viht B. Cement i izvest'. Kiev, 2008. 470 s.
7. Suhanov V.G., Vyrovoy V.N., Korobko O.A. Struktura materiala v strukture konstrukcii. Odessa : POLIGRAF, 2016. 244 s.
8. Tkachenko G.G., Kazmirchuk N.V., Vyrovoy V.N., Borodulin S.D. Vliyanie aktivatsii na izmenenie svojstv tverdeyushchih i zatverdevshih cementnyh kompozitsij // Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva та arkhitektury. 2006. Vyp. 20. S. 351-354.

**МОДИФІКОВАНИЙ РЕСУРСЕКОНОМНИЙ ШТУЧНИЙ КАМІНЬ
ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА АРХІТЕКТУРНОГО ДЕКОРУ І СТИНОВИХ
ВИРОБІВ НА ОСНОВІ ГІПСОВОЇ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ**

Гасан Ю.Г., к.т.н., професор, Gasan Y.G., Ph.D., Professor, ORCID ID: 0000-0003-0035-9702, Тарасевич В. І., к.т.н., Tarasevich V.I., Ph.D., ORCID: 0000-0002-3249-7029

Дроздова О.В., аспірант, Drozdova O.V., graduate student, olhadrozdova@ukr.net, ORCID ID: 0000-0003-4717-588X, Kyiv National University of Construction and Architecture

В статті наведено результати досліджень модифікування штучного гіпсового каменю розробленим гідрофобізуючим хімічним розчином на основі полісульфіду кальцію та діоксиду титану. Наведено порівняльні показники водопоглинання вихідних і просочених розчином зразків. Досліджені характеристики вихідних матеріалів. Показано, що гідрофобізація розробленим хімічним розчином, залежно від кількості нанесених шарів чи часу просочення, має високі показники коефіцієнту розм'якшення виробів, який знаходиться в межах 0,6...0,82.

The article presents the results of studies of modification of artificial gypsum stone developed by a hydrophobic chemical solution based on calcium polysulfide and titanium dioxide. The comparative indices of water absorption of the initial and impregnated samples are given. The characteristics of the starting materials are given. It is shown that the hydrophobization of the developed chemical solution, depending on the number of applied layers or the time of impregnation, has a high coefficient of softening of the products, which is in the range of 0.6...0.82.

The dependence of the change in the weight of the samples and the depth of penetration of the solution in the structure of gypsum stone on the number of layers of the coating is shown. The depth of impregnation was determined by splitting the specimens.

It is shown that the aggregate increases strength, and the aggregate is selected according to the purpose of the products: wall and architectural decoration elements.

Ключові слова: гіпсовий камінь, в'яжуче, діоксид титану, сірка, просочення. Gypsum stone, binder, titanium dioxide, sulfur, impregnation

Для виготовлення стінових виробів і елементів архітектурного декору на основі модифікованої гіпсової в'язучої речовини з подальшою обробкою хімічним розчином для гідрофобізації, підвищення довговічності і міцності є потреба у таких сировинних матеріалах:

- 1) гіпсова в'язуча речовина;
- 2) діоксид титану;
- 3) полісульфід кальцію;
- 4) вапно негашене;

При виготовленні виробів у якості в'язучої речовини застосовується будівельний гіпсова в'язуча речовина марки Г-5, Г-10, що відповідають вимогам ДСТУ Б.В.2.7-82-2010.

Діоксид титану посідає найбільш впевнену позицію на ринку пігментів. Його широко застосовують у виробництві лакофарбових матеріалів, паперу, пластмас, гуми. Ведуча роль TiO_2 обумовлена комплексом властивостей: високою білизною, дисперсністю, світлостійкістю, атмосферостійкістю, хімічною інертністю. Застосування часток TiO_2 тонкого помелу призводить до значного підвищення його фотокаталітичної активності. Вимоги до діоксиду титану регламентовані ГОСТ 9808 – 84 (табл. 1).

Таблиця 1

Діоксид титану Р-1 (ГОСТ 9808 – 84)

Найменування показника	Значення
Масова частка діоксиду титану, %, не менше	98
Масова частка рутильної форми, %, не менше	95
Масова частка легких речовин, %, не більше	0,5
Масова частка водорозчинних речовин, %, не більше	0,4
рН водяної суспензії	6,5 – 8,0
Залишок на ситі з сіткою 0045, %, не більше	0,15
Залишок на ситі з сіткою 016, %, не більше	Не допускається
Розбілююча здатність, у.о., не менше	1500 – 1600
Укривистість, $г/м^2$, не більше	40
Білизна, у.о., не менше	92 – 95

Цінними специфічними властивостями сірки є гідрофобність, бактерицидні та зв'язуючі властивості, низька токсичність та хімічна стійкість у кислому середовищі. Легкість нанесення сірки у вигляді дисперсних покриттів з розбавлених водних розчинів за допомогою розпилюючих пристроїв дозволяє обробляти будь-які поверхні – нерівні, пористі і гладкі, тому її актуально застосовувати у якості гідрофобізатора для традиційних будівельних матеріалів (бетон, цегла, гіпс тощо) [1].

Вимоги до полісульфиду кальцію ТУ 2153-003-55841212-2003 (табл.2).

Таблиця 2

Полісульфід кальцію (ТУ 2153-003-55841212-2003)

Показник	Норма	Метод випробування
1. Зовнішній вигляд	Рідина світло жовтого чи червоного кольору	По п. 5.1. ТУ 2153-003-55841212-2003
2. Щільність, г/см ³ , в межах	1,10 - 1,40	По ГОСТ 18995.1 и п. 5.2. ТУ 2153-003-55841212-2003
3. Концентрація полісульфіду кальцію CaSn в розчині, % мас., в межах	20-40	По п.5.3. ТУ 2153-003-55841212-2003

Продукт тверднення на основі гіпсових в'язучих речовин вважається майже ідеальним будівельним матеріалом, оскільки є екологічно безпечним, негорючим та вогнетривким. Технологія виготовлення виробів на основі гіпсових в'язучих речовин відрізняється достатньою простотою, низькою енергоємністю, різноманітністю способів формування, швидкістю тверднення, можливістю удосконалення якості поверхні виробів і утворення будь-якої текстури, а також можливістю гнучкого регулювання їхніх експлуатаційних характеристик. Варто зазначити, що декоративні вироби на основі гіпсу мають високий ступінь білизни, що у разі необхідності дозволяє експериментувати з кольором шляхом введення пігментів або фарбування. Крім того, застосування гіпсу при виробництві стінових виробів дозволяє виготовляти вироби малого перерізу з достатньою міцністю на згин [2]. Вимоги до гіпсової в'язучої речовини наведені в табл. 3, до повітряного вапна в табл.4.

Таблиця 3

Стандартні властивості гіпсу будівельного Г-5, Г-10
(ДСТУ Б.В.2.7-82-2010)

Найменування показника	Значення	
Міцність при стиску, не менше	Г-5	5 МПа
	Г-10	10 МПа
Міцність при згині, не менше	Г-5	2,5 МПа
	Г-10	4,5 МПа
Тонкість помелу (залишок на ситі 0,2 мм)	не більше 14%	
Терміни тужавлення: початок кінець	не раніше 6 хв не пізніше 30 хв	

Вимоги до повітряного вапна (ДСТУ Б В.2.7-90-99)

Найменування показників	Гідратне вапно сортів	
	1	2
Активні СаО+MgO, не менше: без добавок, у % за масою	67	60
з добавками, у % за масою	50	40
Активний MgO, у % за масою не більше:	-	-
CO ₂ , не більше, у % за масою: без добавок	3	5
з добавками, у % за масою	2	4
Непогашені зерна, не більше:	-	-

Тобто з повною відсутністю активного MgO і непогашених зерен.

Для підвищення довговічності, міцності та вологостійкості елементів архітектурного декору на основі гіпсовмісних в'язучих речовин застосували розчин на основі полісульфіду кальцію та діоксиду титану. Наявність у складі діоксиду титану дозволяє отримати більш світлий колір виробів після обробки [3].

У таблиці наведено дані для зразків виготовлених на основі гіпсової в'язучої речовини, що вказують на істотне поліпшення її основних, визначаючих термін служби, характеристик (табл.5).

Обробку здійснювали при кімнатній температурі просоченням шляхом занурення виробів в хімічний розчин, розпиленням, нанесенням розчину пензлем. Такі способи забезпечують простоту обробки і високу ефективність.

Даний метод гідрофобізації універсальний і ефективний як спосіб захисту будівельних виробів та конструкцій на основі гіпсової в'язучої речовини, що перебувають під дією атмосферних впливів [4]. Показники зразка виготовленого на основі гіпсової в'язучої речовини після обробки отриманим складом хімічного розчину наведені в таблиці 5.

Таблиця 5

Показники зразка виготовленого на основі гіпсової в'язучої речовини після обробки отриманим складом хімічного розчину

№	Фізико-механічні показники	Контрольний зразок	6 шарів розч. нанес. пензл.	Розпилення	Занурення 2 год	Занурення 4 год	Занурення 6 год
1	Міцність при стиску, МПа	10,1	11,6	11,5	10,8	11,1	12,2
2	Міцність при згині, МПа	4,5	4,8	4,9	4,8	4,9	4,9
3	Коефіцієнт розм'якш.	0,5	0,81	0,81	0,63	0,82	0,83
4	Морозостійкість	0	50	50	0	50	50

Аналіз наведених в таблиці 5 даних показує, що обробка зразків не зменшує міцності виробів на основі модифікованої гіпсової в'язучої речовини на стиск і на згин. Це важливо, адже більшість розчинів для обробки знижують ці показники. Спосіб занурення виробів у розчин на 2 години є найменш ефективним. Він чинить незначний вплив на коефіцієнт розм'якшення виробів, тобто на їх водостійкість, а також не впливає на показники морозостійкості. Всі інші способи обробки (нанесення розчину на виріб пензлем у 6 шарів, розпилення та занурення виробів у розчин на 4 та 6 годин) значно підвищують коефіцієнт розм'якшення виробів та забезпечують морозостійкість до 50 циклів поперемінного заморожування і відтавання.

Застосування даного складу дозволяє істотно спростити технологію обробки матеріалів. По-перше, просочення виробів можна проводити при кімнатній температурі і при атмосферному тиску. По-друге, ступінь просочення можна легко регулювати, змінюючи тривалість, кратність просочення. Необхідно відзначити, що просочення даним складом не викликає додаткових напружень в матеріалі, які можуть призводити до зниження міцності матеріалів і до появи в ньому тріщин.

Спосіб обробки дозволяє проведення ремонтно-відновлювальних робіт в польових умовах, ефективний для довготривалого захисту споруд від вологи, а також для збільшення терміну служби виробів та конструкцій.

З таблиці 5 видно, що використання розробленого розчину дозволяє забезпечити водостійкість штучного каменю на основі гіпсової в'язучої речовини, зменшити водопоглинання та зберегти міцність матеріалу.

У таблиці 6 наведено залежність зміни ваги зразків і глибини проникнення розчину в структуру гіпсового каменю від кількості шарів покриття. Глибина просочування визначалася при розколюванні зразків.

Таблиця 6

Результати нанесення сірковмісного розчину пензлем на 6 граней кубічних зразків розмірами 10x10x10 см

№ зразка	Вага зразка, г	Кіл. шарів покриття	Зміна ваги, г	Зміна ваги, %	Глибина просочення, мм
1	2228	-	-	-	-
2	2299	2	11	0,5	6,5
3	2305	4	17	0,76	9,8
4	2308	6	20	0,9	11,5
5	2310	8	22	1,0	12,7
6	2314	10	26	1,1	15,0

З таблиці 6 очевидна висока проникна здатність хімічного розчину – при шостому нанесенні розчину глибина проникнення до 10 мм. Також, висока проникна здатність складу при обробці гіпсових виробів шляхом їх занурення.

Виявлено, що оптимальною тривалістю просочування, з точки зору глибини проникнення розчину в структуру гіпсового каменю, а також умов технологічності процесу - впродовж 4-6 годин достатній для надійного і тривалого захисту будівельних виробів і конструкцій від впливу атмосферних і хімічних чинників. В таблиці 7 наведені показники міцності гіпсобетону на різних заповнювачах.

Таблиця 7

Показники міцності гіпсобетону на різних заповнювачах

№	Вид заповнювача	Витрата матеріалу на 1 м ³ гіпсобетону, кг		Міцність, МПа		Густина, кг/м ³
		Розроблена в'яжуча речовина	Заповнювач	При стиску	При згині	
1	Ценосфери	1000	500	16,7	8,9	1350
2	Ценосфери	780	780	16,0	8,9	1340
3	Ценосфери	570	1150	15,1	8,2	1250
4	Деревна стружка	860	860	14,6	7,6	1000
5	Деревна стружка	600	1200	14,1	7,0	800
6	Пісок	920	460	16,2	8,8	1630
7	Пісок	730	450	15,3	8,7	1620
8	Пісок	470	400	12,1	7,3	1620

З таблиці 7 видно, що заповнювач збільшує міцність на згин в межах 12...16,7 МПа, а сам заповнювач обирається відповідно до призначення виробів: стінові чи елементи архітектурного декору.

Отже, вироби на основі розробленої в'язучої речовини після обробки хімічним розчином на основі полісульфіду кальцію і діоксиду титана дозволяють забезпечити міцність при стиску в межах 10...12,2 МПа, коефіцієнт розм'якшення 0,8...0,83 і морозостійкість до 50 циклів.

Додавання діоксиду титану до складу хімічного розчину дозволяє зберегти білий колір виробів, що особливо важливо для елементів архітектурного декору.

1. Микульский В.Г. Строительные материалы / В.Г. Микульский, Г.И. Горчаков, В.В. Козлов, В.Н. Куприянов. – АВС, 2002. – 255 с.
2. Ребиндер П.Ф. Физико-химическая механика дисперсных структур / П.Ф. Ребиндер. – М.: Наука, 1966. – 134 с.
3. Гасан Ю.Г. Хімічний розчин для гідрофобізації будівельних матеріалів на основі гіпсової в'язучої речовини, спосіб обробки таких виробів / Ю.Г. Гасан, О.В. Дроздова // Міжвузівський збірник «Наукові нотатки», Луцьк, 2017. – Випуск № 58. – С. 600.
4. Патент України на корисну модель №121872. Хімічний розчин для гідрофобізації та підвищення довговічності і міцності будівельних матеріалів на основі гіпсової в'язучої речовини // Гасан Ю.Г., Дроздова О.В. – бюл. №24/2017 від 26.12.2017. – 4 с.

ЗАЛЕЖНІСТЬ ТЕРМІНІВ ТУЖАВЛЕННЯ ЛУЖНИХ ЦЕМЕНТІВ ВІД АНІОННОГО СКЛАДУ ЛУЖНОГО КОМПОНЕНТУ

THE DEPENDENCE OF THE SETTING TIME OF ALKALINE CEMENTS ON THE ANIONIC COMPOSITION OF THE ALKALINE COMPONENT

Гоц В.І., д.т.н., проф. (0000-0001-7702-1609), **Петропавловський О.М.**, к.т.н., п.н.с. (0000-0002-3381-1411), **Гелевера О.Г.**, к.т.н., доц. (0000-0002-6285-9780), **Рогозіна Н.В.**, аспірант (0000-0001-9621-4246)

Gots V.I., Doctor of Technical Sciences, Professor (0000-0001-7702-1609), **Petropavlovskii O.M.**, Candidate of Technical Sciences, Leading Researcher (0000-0002-3381-1411), **Helevera O.G.**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (0000-0002-6285-9780), **Rohozina N.V.**, graduate student (0000-0001-9621-4246)

Представлено результати досліджень впливу аніонної складової лужних компонентів на строки тужавлення лужних цементів, нормальну густоту цементного тіста та водопотребу цементно-піщаних розчинів та бетонів.

The results of studies of the influence of the anionic component of alkaline components on the setting time of alkali cements, the normal consistency of cement paste and the water demand of cement-sand mortars and concrete are presented.

The effect of the anionic component of alkaline components was studied, as well as in what aggregate state the alkaline component ввод was introduced in dry powder or in the form of an aqueous solution. It was established that due to changes in the anionic component of the alkaline component, it is possible to adjust the setting time and cement water demand in a fairly wide range while maintaining the total Na_2O content, which makes it possible to use the obtained dependences when designing concrete compositions with desired properties. Having considered the influence of the anionic component of the alkaline component in the powdered state, similar studies were continued in the direction of their use in the form of solutions.

To compare the effect of the aggregate state of the alkaline component on the setting time and water demand of the cement, alkaline solutions were prepared in which the amount of Na_2O was the same as when using the alkaline component in the powder state.

Thus, the possibility of controlling the setting time of cement using Na_2CO_3 over a wide range by changing the state of aggregation of the alkaline component was determined.

As a result of the studies, it was shown that changing the composition and content of the alkaline component of cement allows you to control the setting time in the direction of their elongation and water demand of cement in the direction of lowering the normal density indices, which makes it possible to attract the obtained dependences when assigning concrete compositions with given mobility and viability; changing the type of anionic component of the alkaline component in the direction of adjusting the content of CO_3^{2-} and SiO_3^{2-} allows you to control the water demand of cement-sand mortars and concrete in order to increase the strength of the hardened product; the change in the state of aggregation of the alkaline component allows you to control, within a wide range, the setting time of alkaline cements and its rheological and strength characteristics, both in the early stages of hardening and in vintage age.

Ключові слова: Лужний компонент, водопотреба, бетон, терміни тужавлення, міцність.

Alkaline component, water demand, concrete, setting time, strength.

Вступ. Все ширше використання промислових відходів при виробництві будівельних матеріалів диктує необхідність більш детального вивчення окремих важливих технологічних моментів при використанні цементів на основі таких відходів – зокрема строків тужавлення шлаколуужних цементів та живучості і водопотреби бетонних композицій на їх основі [1-2]. В роботі досліджено вплив на вищеназвані характеристики аніонної складової лужних компонентів, а також в якому агрегатному стані вводили лужний компонент – в сухому порошкоподібному чи у вигляді водного розчину.

Сировинні матеріали та методи досліджень

В роботі використовувались лужні цементи типу ЛЦЕМ І відповідно до ДСТУ Б.В.2.7-181, лужні компоненти, які відрізнялися аніонною складовою і представлені кальцинованою содою (Na_2CO_3), метасилікатом натрію ($\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) та їх поєднанням у різних співвідношеннях ($\text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

Склад доменного гранульованого шлаку, як основного компонента шлаколуужних цементів, представлено в табл.1.

Випробування шлаколуужних цементів виконувалось у відповідності до вимог [3].

Як водоредукуючу та уповільнюючу добавку у таких системах використовували лігносульфонат натрію (ЛСТ), який вводили у вигляді порошкоподібного продукту.

Таблиця 1

Склад доменного гранульованого шлаку									M _o	M _a	K
Вміст оксидів, % мас.											
SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	SO ₃	MnO	TiO ₂	в.п.п.			
39,2	5,1	1,51	47,6	4,42	1,74	0,16	–	0,6	1,17	0,13	1,46

Результати досліджень

В результаті виконання досліджень і отриманих характеристик (табл.2, рис.1) визначено, що використання в якості лужного компоненту порошкоподібної кальцинованої соди Na_2CO_3 , аніонна складова якої представлена CO_3^{2-} , у кількості 3,5% і 4,5% в складі цементів супроводжується зміною строків тужавлення та показників ТНГ (тісто нормальної густини) цементів у напрямку скорочення початку їх тужавлення з 30 хв. до 20 хв. відповідно та зменшення показників ТНГ з 24,75% до 24,5%. При подальшому збільшенні кількості Na_2CO_3 до 5,0% строки початку тужавлення зменшуються до 8 хв., що, як визначено за методикою СТУ МВВ 23908222.019-10 "Методика виконання вимірювань хибного тужавлення цементів", обумовлено явищем "хибного тужавлення". При цьому ТНГ такого складу цементу зменшується до 24,0%.

Таблиця 2

Вплив аніонної складової лужного компоненту на строки початку тужавлення та ТНГ цементів

№ п/п	Склад шлаколужного цементу, % мас.						ТНГ, %	Початок тужавлення, хв.	Σ Na_2O , %
	шлак	Na_2CO_3		$Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$		ЛІСТ			
		по солі	по Na_2O	по солі	по Na_2O				
1	94,25	5,0	2,90	-	-	0,75	24,00	8 (х.т.*)	2,9
2	94,75	4,5	2,60	-	-	0,75	24,40	20	2,6
3	95,25	4,0	2,30	-	-	0,75	24,65	25	2,3
4	95,75	3,5	2,16	-	-	0,75	24,75	30	2,1
5	95,50	3,5	2,16	-	-	1,0	24,25	45	2,1
6	93,25	-	-	6,0	1,80	0,75	21,00	70	1,8
7	92,75	-	-	6,5	1,92	0,75	20,70	60	1,9
8	92,25	-	-	7,0	2,04	0,75	24,40	50	2,0
9	91,25	-	-	8,0	2,40	0,75	19,50	30	2,4
10	89,25	-	-	10,0	2,90	0,75	19,00	20	2,9
11	94,25	2,0	1,20	3,0	0,90	0,75	22,50	90	2,1
12	93,75	2,0	1,20	3,5	1,00	0,75	22,20	82	2,2
13	93,25	2,0	1,20	4,0	1,20	0,75	21,50	68	2,4
14	91,25	2,0	1,20	6,0	1,80	0,75	19,60	36	3,0
15	89,25	2,0	1,20	8,0	2,40	0,75	18,00	20	3,6

Примітка. х.т.* – хибне тужавлення

Для розширення терміну початку тужавлення та уникнення "хибного тужавлення" цементів при використанні Na_2CO_3 було збільшено вміст добавки ЛСТ. Це дозволило отримати цемент з початком тужавлення 45 хв.

Така ж тенденція впливу вмісту лужного компоненту на строки початку тужавлення та ТНГ спостерігається і при використанні в якості порошкоподібного лужного компоненту, аніонна складова якого представлена SiO_3^{-2} ($Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$). Однак відмічено розвиток ще більшого зменшення значень ТНГ, а саме до показників 19,0...21,0%. При цьому відмічена відсутність явища хибного тужавлення у таких цементів при однаковому загальному вмісті Na_2O , яке спостерігалось при використанні Na_2CO_3 .

В разі застосування суміші лужних компонентів $Na_2CO_3 + Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ в кількості 2,0%+3,0%...2,0%+8,0% початок тужавлення змінюється у межах 20...90 хв. при зміні показників ТНГ у межах 18,0...22,5%.

Слід відмітити (див. рис.1, рис.2) прояв адитивного ефекту при використанні суміші лужних компонентів $Na_2CO_3 + Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ в напрямку розширення термінів початку тужавлення і зниження ТНГ цементів в порівнянні з їх окремим використанням при однаковому вмісті за Na_2O .

Відмічено, що використання суміші лужних компонентів $Na_2CO_3 + Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ в кількості 2,0+3,0...2,0+6,0% характеризує цемент термінами тужавлення 90...36 хв. та ТНГ 22,5...19,5%, створюючи, тим самим, умови для впровадження цього підходу при розробці бетонів з підвищеною рухливістю та життєздатністю, у т.ч. за рахунок корегування загального вмісту Na_2O в складі цементу.

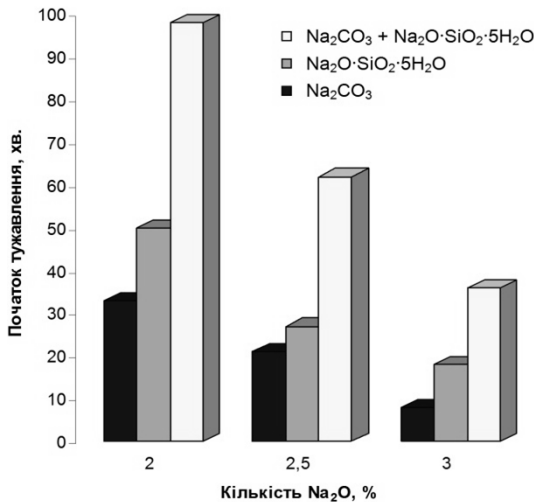


Рис.1. Залежність початку тужавлення шлаколужних цементів від аніонної складової лужного компоненту

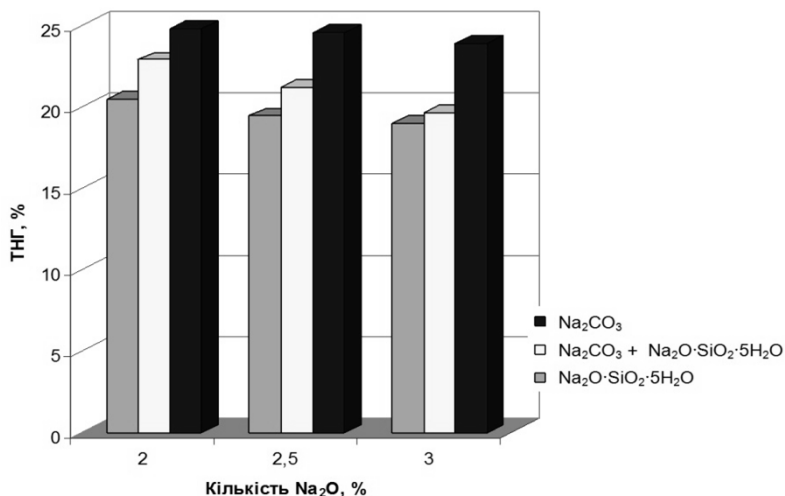


Рис.2. Залежність ТНГ шлаколужних цементів від аніонної складової лужного компоненту

Таким чином, встановлено, що за рахунок зміни аніонної складової лужного компоненту можна регулювати терміни початку тужавлення та водопотребу цементів в достатньо широких межах при збереженні загального вмісту Na_2O , що надає можливість використання отриманих залежностей при призначенні складів бетонів з наперед заданими рухливістю і життєздатністю.

Розглянувши вплив аніонної складової лужного компоненту у порошкоподібному стані аналогічні дослідження були продовжені в напрямку їх використання у вигляді розчинів.

Для порівняння впливу агрегатного стану лужного компоненту на терміни тужавлення та водопотребу цементів готували лужні розчини, в яких кількість Na_2O була така ж сама, як і при використанні лужного компоненту в порошкоподібному стані.

Технологічні характеристики цементів при використанні в якості лужного компоненту Na_2CO_3 та $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$, як в порошкоподібному стані так і в розчині, представлені в табл.3 та на рис.3.

Визначено, що при застосуванні Na_2CO_3 у вигляді розчинів з середньою густиною від $1,18 \text{ кг/м}^3$ до $1,13 \text{ г/см}^3$ початок тужавлення змінюється від 25 хв. до 110 хв., а ТНГ від 25,0% до 24,5%, що на 1,25...3,7 разів вище за терміни тужавлення при використанні лужних компонентів у порошкоподібному стані при практично однакових показниках ТНГ.

Таблиця 3

Вплив агрегатного стану Na_2CO_3 на початок тужавлення цементів

№ п/п	Склад шлаколужного цементу, % мас.				ТНГ, %	Початок тужавлення, хв.	ΣNa_2O , %
	шлак	ЛСТ	агрегатний стан				
			порошок, %	розчин, р (г/см ³)			
При використанні Na_2CO_3							
1	94,75	0,75	3,5	–	24,75	35	2,1
2	95,25		4,0	–	24,50	25	2,3
3	95,75		4,5	–	24,50	20	2,6
4	99,25	0,75	–	1,13	24,50	110	2,1
5			–	1,15	24,75	40	2,3
6			–	1,18	25,00	25	2,6
При використанні $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$							
7	91,25	0,75	8	–	19,25	35	2,4
8	89,25		10	–	19,00	25	2,9
9	99,25	0,75	–	1,15	19,00	25	2,4
10			–	1,22	22,00	20	2,9

Примітка. В складах №№ 1...3 і 7...8 як замішувач використовувалась вода, а в складах №№ 4...5 і 9...10 – водний розчин лужної солі заданої густини.

Таким чином, визначена можливість управління термінами тужавлення цементів з використанням Na_2CO_3 в широких межах за рахунок зміни агрегатного стану лужного компонента.

В табл.3 також наведені технологічні характеристики цементів при використанні в якості лужного компоненту $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$, як в порошокподібному стані так і у вигляді розчинів.

В результаті отриманих даних визначено, що терміни тужавлення таких цементів мало залежать від агрегатного стану лужного компоненту і зберігаються на рівні 20...35 хв.

Відмічено, що використання порошокподібного $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ в кількості 8% і 10% супроводжується зменшенням показників ТНГ з 19,25% до 19,0% в порівнянні з його розчином при якому з підвищенням його густини з 1,15 г/см³ до 1,22 г/см³ ТНГ збільшується з 19,0% до 22,0%.

Характерно, що на відміну від використання в цементах в якості лужного компоненту Na_2CO_3 , застосування $Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ значно знижує їх водопотребу незалежно від агрегатного стану.

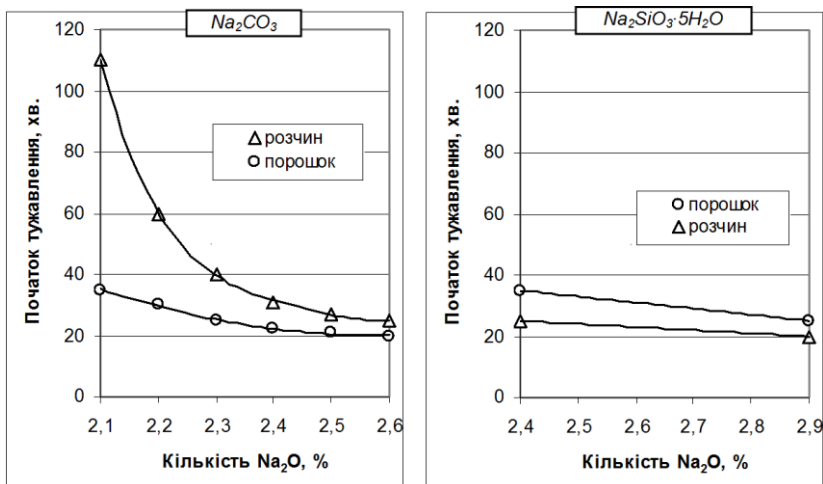


Рис.3. Залежність строків початку тужавлення шлаколужних цементів від виду лужного компонента та його агрегатного стану

В табл.4 показано порівняння технологічних характеристик цементів при використанні лужного компонента зі змішаною аніонною складовою і різним агрегатним станом.

Визначено, що при використанні лужного компонента у вигляді розчину $Na_2CO_3 + Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ з густиною $1,125 \text{ г/см}^3$ строки початку тужавлення цементу складають 70 хв. при ТНГ – 24%, а при використанні $Na_2CO_3 + Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ у порошкоподібному стані із збереженням загального вмісту Na_2O у цементах строки початку тужавлення подовжуються до 90 хв., а ТНГ зменшується до показника 22,5%.

Таблица 4

Вплив агрегатного стану лужного компонента
 $Na_2CO_3 + Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$ на ТНГ та початок тужавлення цементів

№ п/п	Склад шлаколужного цементу, % мас.				ТНГ, %	Початок тужавленн я, хв.	ΣNa_2O , %
	шлак	ЛСТ	агрегатний стан				
			порошок, %				
			Na_2CO_3	$Na_2SiO_3 \cdot 5H_2O$			
1	94,75	0,75	2,0	3,0	–	90	2,1
2	99,25		–	–	1,125	70	

В результаті проведених досліджень показана можливість управління строками тужавлення і водопотребою лужних цементів в широких межах

навіть тільки за рахунок зміни аніонної складової лужного компоненту та його агрегатного стану.

Висновки

В результаті проведених досліджень по розробці методів управління строками тужавлення та регулювання водопотребою лужних цементів показано:

- зміна складу і вмісту лужного компоненту цементів дозволяє керувати строками тужавлення в напрямку їх подовження та водо потребою цементів в напрямку зниження показників ТНГ, що надає можливість залучення отриманих залежностей при призначенні складів бетонів з наперед заданими рухливістю і життєздатністю;
- зміна типу аніонної складової лужного компоненту у напрямку коригування вмісту CO_3^{2-} та SiO_3^{2-} дозволяє керувати водопотребою цементно-піщаних розчинів та бетонів з метою підвищення міцності затверділого продукту;
- зміна агрегатного стану лужного компоненту дозволяє керувати в широких межах строками тужавлення лужних цементів та його реологічними і міцностними характеристиками, як на ранніх етапах твердіння, так і в марочному віці.

1. P.Chindaprasrt, T.Cao Setting, segregation and bleeding of alkali-activated cement, mortar and concrete binders / Handbook of Alkali-activated Cements, Mortars and Concretes, WP, 2015, p.p.113-131.
2. Krivenko P., Petropavlovskii O., Vozniuk H., Lakusta S. The development of alkali-activated cement mixtures for fast rehabilitation and strengthening of concrete structures / Procedia Engineering 195 (2017), p.p. 142-146.
3. ДСТУ Б В.2.7-185:2009 "Цементи. Методи визначення нормальної густоти, строків тужавлення та рівномірності зміни об'єму".
DSTU B V.2.7-185:2009 "Tsementy. Metody vyznachennia normalnoi hustoty, strokiv tuzhavlennia ta rivnomirnosti zminy ob'єmu"

**ДОСЛІДЖЕННЯ РЕОЛОГІЧНИХ ТА ДЕФОРМАТИВНИХ
ХАРАКТЕРИСТИК АЛЮМОСИЛКАТНИХ АДГЕЗИВІВ ДЛЯ
СКЛЕЮВАННЯ ВИРОБІВ ІЗ МАСИВІВ СОСНИ**

**RESEARCH OF RHEOLOGICAL AND DEFORMATIVE
CHARACTERISTICS OF ALUMINOSILICATE ADHESIVES FOR GLUING
PRODUCTS FROM PINE WOOD**

Гузій С.Г., к.т.н., с.н.с. (Київський національний університет будівництва і архітектури, Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів ім. В.Д. Глуховського, м. Київ), **Лашівський В.В., к.т.н., доцент** (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Guzii S., PhD, senior researcher (Kyiv National University of Construction and Architecture, V.D. Glukhovsky Scientific Research Institute for Binders and Materials, Kyiv), **Laschivskiy V., PhD, assistant professor** (National University of Water Management and Nature Management, Rivne)

Досліджені реологічні та деформативні властивості алюмосилікатного адгезиву на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого складу $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифікованого 5% Cr_2O_3 .

The rheological and deformative properties of an aluminosilicate adhesive based on an alkaline aluminosilicate binder composition $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 20\text{H}_2\text{O}$ modified with 5% Cr_2O_3 were studied.

It was shown that aluminosilicate adhesive with a surface tension of 88.1 mN/m is characterized by wetting coefficients ($s=0.648$) and spreadability ($f=62.02$ mN/m), ensures its uniformity on a pine substrate with the formation, after hardening, a film layer with an adhesive strength of up to 2 MPa and a tensile strength along the fibers of up to 10.2 MPa.

It was noted that in the adhesive joint at low stresses from 207 MPa to 230 MPa, the relative shear deformations stabilize at a level of $25\cdot 10^{-5}$ mm, and the adhesive joint is destroyed at shear stresses above 515 MPa with relative shear deformations up to $162.5\cdot 10^{-5}$ mm.

According to the obtained experimental data, aluminosilicate adhesive can be attributed to structural adhesives and recommended for bonding pine wood massifs.

Ключові слова:

Модифікований алюмосилікатний адгезив, деревина сосни, реологічні та

деформативні властивості.

Modified aluminosilicate adhesive, pine wood, rheological and deformation properties.

Вступ. У будівництві клеєні дерев'яні конструкції набули широкого поширення, насамперед, завдяки своїм високим характеристикам міцності, вологостійкості і порівняно невисокими витратами при монтажі. Ще одна перевага клеєних конструкцій полягає у використанні некондиційної деревини. Для склеювання деревини, в основному використовують органічні клеї на полівінілацетатній емульсії з показниками водостійкості D2...D4, фенолформальдегідні, акрилові, епоксидні поліуретанові та інші. Доля мінеральних клеїв незначна і вони, в основному, використовуються для склеювання целюлозовмісних матеріалів. Тому для склеювання деревини перспективним є використання мінеральних клеїв (адгезивів) на алюмосилікатній основі, які повинні забезпечувати міцність клейового шва не нижче міцності деревини на сколювання вздовж волокон і на розтягнення поперек волокон, характеризуватись необхідною водо- та атмосферостійкістю та здатністю витримувати достатні навантаження.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. В основному, для склеювання конструкційних виробів з деревини використовують ПВА-клеї підвищеної водостійкості, в'язкопластичні та тиксотропні характеристики яких достатньо вивчені [1, 2].

У роботі [3-7] досліджено оцінки міцності клейових з'єднань ламелей з хвойних порід деревини в залежності від технологічних режимів склеювання і типу клею. Встановлено, що більш високу якість склеювання забезпечується при використанні ПУР-клею при витраті 170-190 г / кв.м. і тиску пресування в межах 0,6 - 1,0 МПа.

Звідси актуальним стає питання використання для склеювання деревини алюмосилікатних клеїв [8, 9], але воно стримується із-за недостатніх уявлень щодо реології та міцносних характеристик клейових з'єднань на основі алюмосилікатних адгезивів.

Постановка мети і задач досліджень. Метою досліджень є визначення реологічних та деформативних характеристик алюмосилікатних адгезивів для склеювання виробів із деревини сосни. Досягнення мети можливо за рахунок визначення основних показників для конструкційних клеїв, а саме: в'язкості, клейової спроможності, деформативності та міцносних характеристик – міцності при сколюванні вздовж волокон і адгезійної міцності при відриві.

Для реалізації поставлених задач в роботі, в якості алюмосилікатного адгезиву було вибрано модельну в'язучу речовину складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифіковану 5% оксидом хрому [10-12]. Приготування алюмосилікатного адгезиву здійснювали в лабораторному

дисольвері. Технологічну та умовну в'язкості суспензії алюмосилікатного адгезиву визначали за допомогою віскозиметрів Сутгарда та ВЗ 246 з діаметром отвору 4 мм при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Реологічні характеристики знімали за допомогою віскозиметра Брукфільда марки LV D2T в діапазоні швидкостей від 0 до 200 RPM з використанням шпінделей LV-2C(66) і LV-3C(67).

Коефіцієнт поверхневого натягу суспензії алюмосилікатного адгезиву визначали методом відриву капель [13]:

$$\gamma = \frac{mg}{nD}, \text{ [мН/м]}$$

де: m – маса суспензії, г; g – прискорення сили тяжіння, м/см^2 ; n – число капель, $n=25$; D – діаметр капіляру, мм ($D=5$ мм).

Роботу сил адгезії (W_a), когезії (W_k), змочування (W_w) і коефіцієнтів змочування (S) і розтікання (f) визначали згідно даних роботи [14].

Кут змочування визначали за допомогою цифрової зйомки з подальшою обробкою зображення в програмах paint.net і КОМПАС.

Адгезію при відриві визначали за допомогою механічного адгезиметру Novotest АЦ-1 (ГОСТ 27325 і ISO 4624), міцність при сколюванні вздовж волокон визначали за допомогою універсальної випробувальної машини при швидкості навантаження 0,5 мм/хв та вологості клеєних зразків деревини сосни 12% шорсткістю поверхні 60 мкм згідно ДСТУ EN392-2001. Деформаційні характеристики клейових швів згідно вимог ДСТУ EN 380:2008 і ДСТУ EN 384:2001.

Результати досліджень. Основним дисперсійним середовищем алюмосилікатного адгезиву є натрієве рідинне скло. Тому, в першу чергу, визначити його реологічні характеристики як об'єкту для порівняння з реологічними характеристиками алюмосилікатного адгезиву, результати яких наведені в табл. 1.

Як видно з даних табл. 1, алюмосилікатний адгезив являє собою високонаповнену систему, яка за своїми показниками суттєво відрізняється від ненаповненого дисперсійного середовища – рідинного скла.

В першу чергу це помітно по різниці величин умовної в'язкості, коефіцієнтів змочування та розтікання і поверхневого натягу, що значно впливає на кут змочування деревини сосни (рис. 1).

Як видно з рис. 1 величина кутів змочування менша 90° , що забезпечує повне змочування поверхні сосни алюмосилікатним адгезивом при малих швидкостях зсуву (рис. 2, б).

Таблиця 1

Колоїдно-хімічні властивості адгезивів

Показники	Одиниця вимірювання	Вид адгезиву	
		NaPC	Na6Sm
Умовна в'язкість по ВЗ 246, $\varnothing=4$ мм при 20°C	сек	14	98
Технологічна вязкість по Суттарту при 20°C	мм	286	207,5
Поверхневий натяг, γ	мН/м	54,3	88,1
$\cos\Theta$	–	0,8564	0,29604
W_a	мН/м	100,81	114,18
W_k	мН/м	108,6	176,2
W_w	мН/м	46,5	26,08
s	–	0,9283	0,648
f	мН/м	-7,79	-62,02

Примітка: W_a , W_k , W_w – робота сил адгезії, когезії та змочування; s , f – коефіцієнти змочування та розтікання; NaPC – натрієве рідинне скло з силікатним модулем $M_c=2,84$ густиною $1,383 \text{ г/см}^3$; Na6Sm – адгезив на основі в'язучої речовини складу $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 6\text{SiO}_2\cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифікованої 5% Cr_2O_3 .

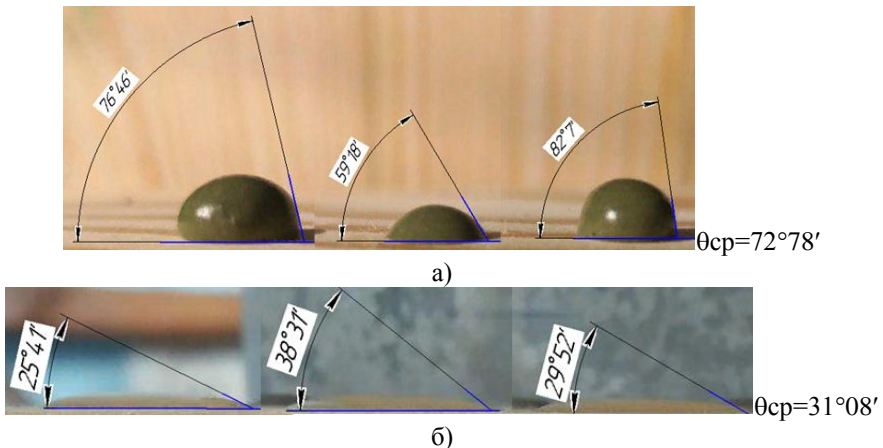
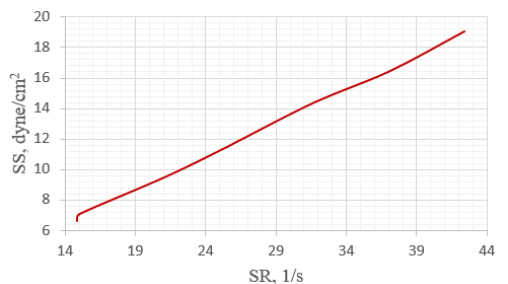
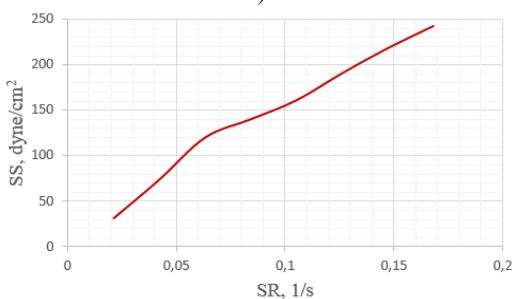


Рис. 1. Кути змочування соснового підкладу алюмосилікатним адгезивом (а) і натрієвим рідинним склом (б)



а)



б)

Рис. 2. Залежності зусиль зсуву від швидкості зсуву суспензій адгезиву, отриманих на основі: а – рідинного скла; б – на в'язучій речовині складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифікованій 5% Cr_2O_3

Із рис. 3, а видно, характер зміни динамічної в'язкості в інтервалі швидкостей $0,1 \dots 0,8$ RPM суспензії високо наповненого алюмосилікатного адгезиву має точку екстремуму – 177600 сП, іншими словами межу плинності при $v=0,3$ RPM, після якої спостерігається розтікання алюмосилікатного адгезиву по поверхні зразка з деревини сосни зі зменшенням показника динамічної в'язкості при збільшенні числа обертів шпинделю. В той час, як суспензія на основі рідинного скла при збільшенні швидкості обертання шпинделю практично не змінює свою динамічну в'язкість (рис. 3, а).

Пластичну в'язкість розглянутих суспензій оцінювали з залежності $v=f(M)$ по котангенсу кута нахилу. Для рідинного скла пластична в'язкість змінюється лінійно незалежно від швидкості обертання шпинделю та моменту, її величина становить 87,43 сП (рис. 4, а). Для алюмосилікатної суспензії характер зміни пластичної в'язкості має нелінійність, що характерно для псевдопластичних рідин. На кривій $v=f(M)$ відмічено три ділянки з різним кутом нахилу, а саме: $\text{ctg}17^\circ45' = 86,72$ (сП) в діапазоні швидкостей від 0,1 до 0,3 RPM і моменту від 12,3 до 44,4 %; $\text{ctg}28^\circ12' = 87,96$

(сП) в діапазоні швидкостей від 0,3 до 0,5 RPM і моменту від 44,4 до 63,9%; $\text{ctg}25^{\circ}24' = 87,73$ (сП) в діапазоні швидкостей від 0,5 до 0,8 RPM і моменту від 63,9 до 96,4 %. Цілком ймовірно, що стабілізація значень пластичної в'язкості при збільшенні швидкості обертання шпинделю та моменту (рис. 4, б) досягається за рахунок рівномірного розподілення в дисперсійному середовищі частинок дисперсійної фази, що, в свою чергу, відображається технологічності та рівномірності нанесення алюмосилікатного адгезиву на підклад сосни.

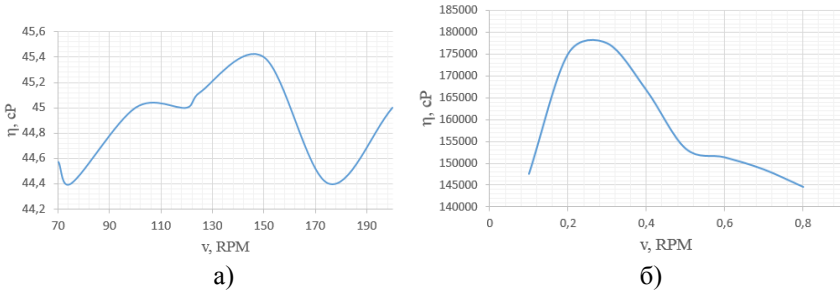


Рис. 3. Зміна динамічної в'язкості суспензій в залежності від швидкості обертання шпинделю, отриманих на основі: а – рідинного скла; б – на в'язучій речовині складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифікованій 5% Cr_2O_3

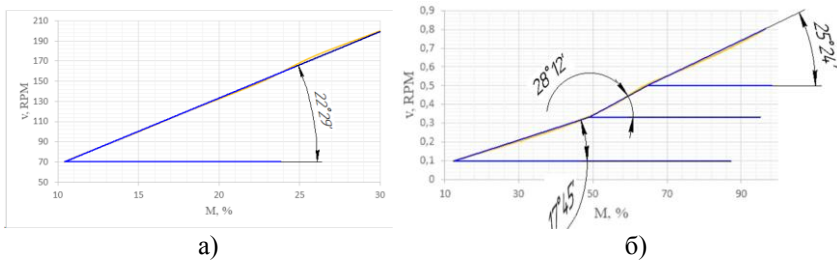


Рис. 4. Зміна пластичної в'язкості суспензій в залежності від швидкості обертання шпинделю та моменту, отриманих на основі: а – рідинного скла; б – на в'язучій речовині складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифікованій 5% Cr_2O_3

Адгезійна міцність після 7 доби тверднення складає 2 МПа, а міцність при сколюванні вздовж волокон, відповідно, 10,2 МПа.

Деформаційні характеристики клейових з'єднань з деревини сосни, виготовлених в умовах полігону Рівненського національного університету водного господарства та природокористування, досліджувались на трьох зразках (рис. 5).

Навантаження зразків здійснювалося ступенями. На кожному ступені знімалися відліки по індикаторах для визначення деформацій зсуву клеєної деревини. В результаті були побудовані графіки залежності напруження зсуву від деформації (рис. 5).

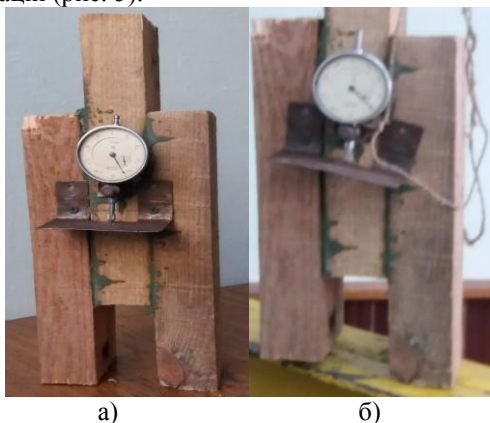
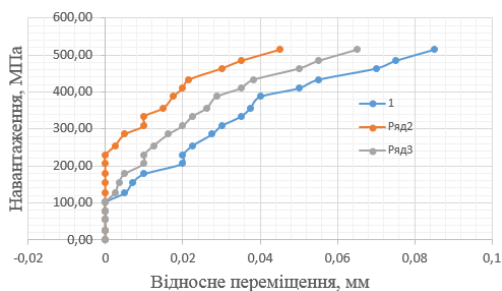


Рис. 5. Зовнішній вигляд зразків клеєного з'єднання до (а) та після (б) випробувань



а)

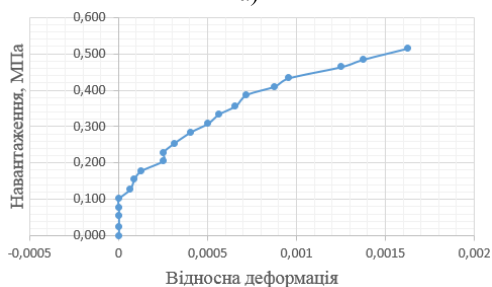


Рис. 6. Залежність відносного переміщення (а) і відносної деформації (б) клеєної деревини сосни

Як видно з графіку (рис. 6, а) до напруження 100 МПа середні відносні деформації зсуву залишалися нульовими. При наступному збільшенні навантаження відбулося зростання відносних деформацій зсуву. При напруженні від 207 МПа до 230 МПа відбулася нетривала стабілізація відносних деформацій зсуву на рівні $25 \cdot 10^{-5}$ мм.

Руйнування клейового шву відбулося при напруженнях зсуву 515 МПа. При цьому відносні деформації зсуву склали $162,5 \cdot 10^{-5}$ мм (рис. 6, б).

Висновки. Досліджені реологічні та деформативні властивості алюмосилікатного адгезиву на основі лужного алюмосилікатного зв'язуючого складу $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 20\text{H}_2\text{O}$, модифікованого 5% Cr_2O_3 . Відмічено, що динамічна в'язкість суспензії адгезиву в діапазоні швидкостей від 0,1 до 0,8 RPM змінюється від 147600 до 144600 сП, а середня пластична в'язкість в цьому ж діапазоні швидкостей, становить величину 87,39 сП. Виявлено, що при швидкостях зсуву від 0,021 до 0,168 1/сек спостерігається зростання зусилля зсуву від 31 до 242,9 dyne/cm² за рахунок стабілізації та рівномірності розподілення частинок дисперсійної фази в дисперсійному середовищі адгезиву.

Показано, що алюмосилікатний адгезив при значенні поверхневого натягу 88,1 мН/м характеризується коефіцієнтами змочування ($s=0,648$) і розтічності ($f=-62,02$ мН/м), що забезпечує рівномірність його нанесення на підклад осни.

Адгезійна міцність після 7 доби тверднення складає 2 МПа, а міцність при сколюванні вздовж волокон, відповідно, 10,2 МПа.

Відмічено, що при напруженні від 207 МПа до 230 МПа відбулася нетривала стабілізація відносних деформацій зсуву на рівні $25 \cdot 10^{-5}$ мм. Руйнування клейового шву відбулося при напруженнях зсуву 515 МПа. При цьому відносні деформації зсуву склали $162,5 \cdot 10^{-5}$ мм.

По отриманим експериментальним даним алюмосилікатний адгезив можливо віднести до конструкційних клеїв.

Подяки. Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, яка виконувалась в рамках бюджетного фінансування № 2ДБ-2017, а також за розвиток теми досліджень у програмі наукового співробітництва COST Action CA15202 “Self Healing concrete: the path to sustainable construction” рамкової програми Європейського Союзу HORIZON2020.

1. Гайдук С. С., Исследование тиксотропных свойств клеевых материалов на основе поливинилацетата. - Труды БГТУ. - 2013. - №2. - с. 130-134.
2. Коробко Е.В. и др. Вязко-пластичные и тиксотропные свойства модифицированных поливинилацетатных клеев. - Труды БГТУ. - 2016. - №2. - с. 219-224.

3. Мухурова Е.А., Гайдук С.С., Шетько С.В. Увеличение прочности клеевого соединения активированной обработкой поверхностей склеивания. - Труды БГТУ. - 2014. - №2. - с. 125-127.
4. Гомон С.С., Павлюк А.П. Дослідження роботи клейових швів конструкцій з деревини за дії повторних навантажень. – Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2014. – Вип. 29. – С. 117-122.
5. Гомон С.С., Павлюк А.П., Ющук О.В. Дослідження роботи деревини на сколювання вздовж волокон за дії повторних навантажень. – Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2015. – Вип. 30. – С. 116-122.
6. Овсянников С.И., Шаповалов Д.Ю. Повышение прочности клеевых соединений деревянных конструкций. Вестник науки и образования Северо-Запада России, 2018, Т.4, №4, с. 1-6.
7. Разиньков Е.М. Прочность склеивания пиломатериалов в технологии клееного бруса для жилых домов. Лесотехнический журнал. – 2016. - №3. – С. 127 – 134.
8. Krivenko P.V., Petropavlovskii O.N., Vozniuk G.V. Alkaline aluminosilicate binder for gluing wood board materials. Journal “Key Engineering Materials”. – Vol. 761 KEM, 2018. - pp. 11-14. doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.761.11.
9. Krivenko, P., Guzii, S. (2018). The effect of modifying additives on the modulus of elasticity and strength of adhesives based on an alkaline aluminosilicate binder. Proceed. of the 20. Ibausil. Internationale Baustofftagung. – Weimar, Germany. Tagungsbericht – Band 1. – pp. 2-1213 – 2-1218.
10. Kryvenko P, Kyrychok V and Guzii S (2016), Influence of the ratio of oxides and temperature on the structure formation of alkaline hydro-aluminosilicates, Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Vol. 5(5-83), pp. 40-48. doi: 10.15587/1729-4061.2016.79605.
11. Barrer, R. (1982). Hydrothermal chemistry of zeolites. London Academic Press., UK.
12. Trochez, J., Mejía de Gutiérrez, R., Rivera, J., Bernal, S. (2015). Synthesis of geopolymer from spent FCC: Effect of SiO₂/Al₂O₃ and Na₂O/SiO₂ molar ratios. Mater. Construc., 65, e046.
13. Ершов Ю.А. Коллоидная химия. Физическая химия дисперсных систем. – М.: ГЭОТАР-Медиа, 2013. – 352 с.; Глазачева Е.Н., Успенская М.В. Коллоидная химия. Методические указания к выполнению лабораторных работ. Учебное пособие – СПб: Университет ИТМО, 2015. – 62 с.
14. Guzii S. Investigation of the influence of organomineral additives on the colloid-chemical properties of geocement dispersion. J., Technology audit and production reserves, No 3/1(35), 2017, pp. 38-43 <https://doi.org/10.15587/2312-8372.2017.105678>

**ШВИДКОТВЕРДУНЧІ РОЗЧИНОВІ КОМПОЗИЦІЇ ДЛЯ 3D
БУДІВЕЛЬНОГО ПРИНТЕРУ**

**FAST-HARDENING MORTAR COMPOSITIONS FOR A 3D
CONSTRUCTION PRINTER**

Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318,
Степасюк Ю.О., к.т.н., ст. викладач (Національний університет водного
господарства та природокористування, м. Рівне)

Dvorkin L.J., doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-
6318, **Stepasyuk Y.O.**, candidate of technical sciences, senior teacher (National
University of Water Environmental Engineering, Rivne)

У статті наведено результати дослідження швидкотверднучих розчинових композицій, виготовлених на гіпсоцементношлакових в'язучих, які характеризуються підвищеною міцністю та термічним опором і за своїми фізико-механічними характеристиками не поступаються звичайній керамічній цеглі. Проведені дослідження показали можливість отримання на основі гіпсоцементношлакового в'язучого модифікованого добавкою суперпластифікатора на полікорбоксилатній основі швидкотверднучих розчинових композицій, які можуть бути використані як робочі суміші для 3D принтера.

Based on the analysis of literary sources characterizing the current trends and the physical and mechanical foundations for the development of special building materials, the possibility of creating a mortar for a 3d building printer is theoretically substantiated, which provides the intensity of hardening and stability of performance indicators due to the formation of its structure using a composite binder. The obtained results indicate that on the basis of the developed gypsum cement slag binders it is possible to obtain fast-hardening mortar compositions, which are characterized by increased strength and thermal resistance and in their physical and mechanical characteristics are not inferior to ordinary ceramic bricks. Thus, the conducted studies have shown the possibility of obtaining on the basis of gypsum cement slag binder modified with the addition of a superplasticizer on a polycarboxylate basis of fast-hardening mortar compositions that can be used as working mixtures for a 3D printer. Due to the complexity of installing steel reinforcement in the manufacture of buildings and structures using 3D printing technology, the influence of 12 mm polypropylene fiber on the

strength characteristics of mortars on the basis of gypsum cement slag binders were studied.

Ключові слова: Гіпс, шлак, суперпластифікатор, міцність, цемент, розчин.
Gypsum, slag, superplasticizer, strength, cement, mortar.

Вступ. З початку ХХ століття автоматизація виробництва зростає майже у всіх сферах. Впровадженню автоматизації в будівельну галузь заважали економічна непривабливість дорогого устаткування і обмеження в матеріалах [1], які піддаються автоматизованому виробництву. Будівельна галузь сьогодні стикається з такими серйозними проблемами, як низька продуктивність праці, висока статистика аварійних ситуацій на будівельних майданчиках, складність контролю будівельних процесів [2]. Очевидно, що будівельна галузь є одним з найбільших споживачів невідновлюваних ресурсів і природних матеріалів по всьому світу [3]. Адитивні технології розширили горизонти для багатьох напрямків виробництва, що динамічно розвиваються. 3D-друк дозволив розробленим в лабораторних умовах технологіям вийти на новий рівень. Адитивні технології (від англійського Additive manufacturing) - узагальнена назва технологій, які передбачають виготовлення виробу по даним цифрової моделі (або САD-моделі) шляхом пошарового нанесення матеріалу [4]. Технології пошарового синтезу можуть стати проривом для конструкцій, що виготовляються з матеріалів на основі цементу.

Аналіз останніх досліджень. Наукові вишукування, спрямовані на вирішення проблем будівельного 3D-друку, ведуться в багатьох інститутах по всьому світу. Є ряд патентів на будівельні суміші для принтерів [5-9]. Крім матеріалів, патентуються так само принтери і технології друку [10-12].

Цементні склади, які тверднуть тривалий час не можуть задовольнити високу продуктивність 3D-друку [6]. Звичайний бетон на основі цементу не задовольняє вимогам, що пред'являються до матеріалів для будівельного 3D-друку [13]. Для оптимізації процесу тривимірного друку повинні бути враховані дві умови. По-перше, це необхідність забезпечити достатнє зчеплення між шарами, враховуючи, що сила зчеплення зменшується зі збільшенням часового проміжку між ними [14]. По-друге, матеріал повинен набрати достатню міцність, щоб витримати вагу згодом вкладених шарів без деформації. Зіставлення цих двох обмежень призводить до парадоксу оптимізації швидкості друку. Часовий інтервал між двома вкладеними шарами повинен бути досить довгим, щоб забезпечити необхідну міцність, але також невеликим для забезпечення міцного зчеплення між шарами [15].

На початку двохтисячних років відразу кілька незалежних один від одного груп вчених (Китаю, США, Великобританії і Нідерландів) почали дослідження в області застосування технології 3D друку в будівництві. Ними

було розроблено ряд складів розчинових сумішей, виготовлених на основі як портландцементу з різними мінеральними добавками [16-19], та і на основі гіпсу [20, 21].

Великий комплекс експериментальних досліджень, що до отримання швидкотверднучих водостійких в'язучих на основі будівельного гіпсу виконано А.В. Ферронскою, В.Ф. Коровяковим та іншими вченими. В роботі [22] наведені експериментальні результати, якими встановлено можливість отримання на основі водостійких гіпсоцементнопуцоланових в'язучих, модифікованих пластифікуючими добавками на нафталінформальдегідній основі, бетонів та розчинів з міцністю до 30 МПа.

На сучасному етапі розвитку будівельної індустрії розроблено велику кількість суперпластифікаторів нового покоління, виготовлених на основі полікарбоксилатного ефіру. Характерною особливістю цих пластифікуючих добавок є суттєве зниження (до 40%) водопотреби в'язучих, бетонів та розчинів і як наслідок збільшення їхньої міцності. Аналіз експериментальних досліджень наведених в [23] свідчить про можливість суттєвого підвищення міцності в'язучих виготовлених на основі будівельного гіпсу шляхом введення до їх складу суперпластифікатора полікарбоксилатного типу Melflux 2651 F.

Результати досліджень. Метою роботи було встановлення можливості використання гіпсоцементношлакового в'язучого (ГЦШВ) для приготування швидкотверднучих розчинових композицій для 3D будівельного принтеру.

В якості в'язучого було використано ГЦШВ отримане шляхом сумісного помелу будівельного гіпсу марки Г-5 (60 %), портландцементу ПЦ І М 500 (20%) та доменного гранульованого шлаку (20%). Додатково при помелі вводилась добавка суперпластифікатор Melflux 2651 F в кількості 0,5% від маси в'язучого. За результатами попередніх досліджень [24] було встановлено, дане в'язуче характеризується міцністю 21 МПа у віці 2 годин та 43 МПа у віці 28 діб, а також коефіцієнтом розм'якшення 0,97.

Таблиця 1

Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання			Інтервал варіювання
	Код	Натуральний вид	-1	0	+1	
1	X_1	Витрата фібри (Ф), кг/м ³	0	2,5	5	2,5
2	X_2	Витрата поризатора (П), %	0	0,2	0,4	0,2
3	X_3	Водов'язуче відношення (В/В)	0,23	0,25	0,27	0,02

Всі експериментальні дослідження, результати яких наведені в даній статті, були виконані із застосуванням математичного планування експерименту. Для цього було реалізовано трирівневий трифакторний план В₃ [25]. Умови планування експерименту наведені в табл.1. У всіх точках

плану було виготовлено зразки розчину зі співвідношенням в'яжуче:пісок – 1:1.

Внаслідок складності встановлення стальної арматури при зведенні будівель та споруд за технологією об'ємного 3D друку, для підвищення границі міцності при згині, додатково до складу розчину вводилась поліпропіленова фібра довжиною 12 мм. Вміст фібри варіювався в діапазоні від 0 до 5 кг/м³.

Таблиця 2

Результати експериментальних досліджень

№	Вміст фібри, кг/м ³	Вміст пори- затора, %	В/В	R _{зг} ^{2год} , МПа	R _{ст} ^{2год} , МПа	R _{зг} ²⁸ , МПа	R _{ст} ²⁸ , МПа	ρ ₀ , кг/м ³
1	5	0,4	0,27	3,75	6,0	9,76	13,0	2049
2	5	0,4	0,23	4,15	8,2	11,71	30,6	1949
3	5	0	0,27	4,74	10,3	10,39	35,4	1735
4	5	0	0,23	5,99	11,1	12,64	49,0	1670
5	0	0,4	0,27	3,23	5,9	7,42	17,0	2115
6	0	0,4	0,23	3,58	7,5	8,25	27,4	2027
7	0	0	0,27	3,71	8,6	9,05	26,6	1637
8	0	0	0,23	4,91	8,8	10,18	33,0	1584
9	5	0,2	0,25	4,12	9,1	11,11	28,0	1801
10	0	0,2	0,25	3,32	7,9	8,71	22,0	1791
11	2,5	0,4	0,25	3,74	7,3	8,20	17,4	2042
12	2,5	0	0,25	4,90	10,1	9,48	31,4	1664
13	2,5	0,2	0,27	3,66	8,5	8,02	19,5	1827
14	2,5	0,2	0,23	4,46	9,7	9,56	31,5	1751
15	2,5	0,2	0,25	3,92	9,0	8,81	23,0	1796
16	2,5	0,2	0,25	3,92	9,2	8,76	23,1	1794
17	2,5	0,2	0,25	3,91	9,1	8,9	23,0	1800

Для зниження середньої густини та відповідного підвищення термічного опору огорожуваних конструкцій до складу розчинів на основі запропонованого ГЦШВ було додатково введено добавку поризатор UFAPORE CC85. Вміст добавки коливався в діапазоні від 0 до 0,4% від маси в'яжучого. Для зменшення теплопровідності розчинів до їх складу також можна вводити легкі заповнювачі (спучений перлітовий чи вермикулітовий пісок), проте введення добавок -поризаторів як правило, більш доцільний шлях як з економічного, так і з технологічного боку, враховуючи підвищену вартість легкого піску та складності з перемішуванням розчинів на легких заповнювачах.

Після проведення обробки і статистичного аналізу експериментальних даних отримані математичні моделі середньої густини та міцності розчинів на основі досліджуваних в'язучих у вигляді поліноміальних рівнянь регресії. Результати обробки та статистичного аналізу експериментальних даних наведені в табл. 3.

Таблиця 3

Експериментально-статистичні моделі середньої густини та міцності розчинів виготовлених на основі ГЦШВ

Вихідні параметри	Статистичні моделі
Середня густина, кг/м ³	$\rho_0=1796+5X_1-189,2X_2-38,4X_3+56,9X_2^2-7,1X_3^2-41X_1X_2+3X_1X_3+9X_2X_3$; (1)
Міцність при згині у віці 2 годин, МПа	$R_{зг}^{2год}=3,92+0,4X_1-0,58X_2-0,4X_3-0,2X_1^2+0,4X_2^2+0,14X_3^2-0,13X_1X_2-0,01X_1X_3+0,21X_2X_3$; (2)
Міцність при стиску у віці 2 годин, МПа	$R_{ст}^{2год}=9+0,6X_1-1,38X_2-0,6X_3-0,5X_1^2-0,3X_2^2+0,1X_3^2-0,4X_1X_2-0,15X_1X_3-0,35X_2X_3$; (3)
Міцність при згині у віці 28 діб, МПа	$R_{зг}^{28}=8,81+1,2X_1-0,64X_2-0,77X_3+1,1X_1^2+0,03X_2^2-0,016X_3^2+0,25X_1X_2-0,26X_1X_3+0,08X_2X_3$; (4)
Міцність при стиску у віці 28 діб, МПа	$R_{ст}^{28}=23,0+3X_1-7X_2-6X_3+2X_1^2+1,4X_2^2+2,5X_3^2-3,2X_1X_2-1,8X_1X_3-1,03X_2X_3$; (5)

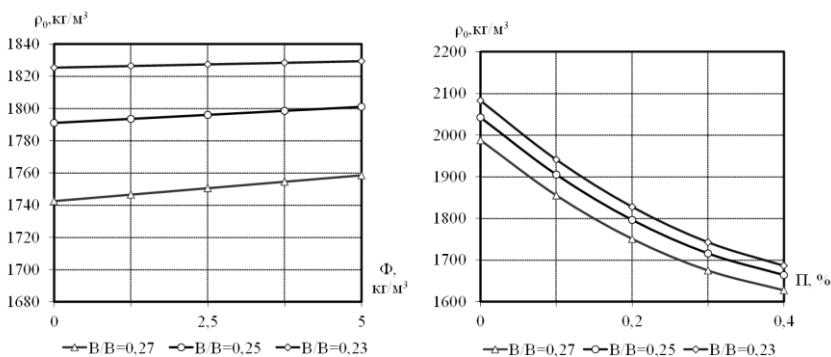


Рис. 1. Вплив варійованих факторів на середню густина розчинів виготовлених на основі ГЦШВ

В результаті аналізу отриманих експериментально-статистичних моделей та побудованих на їх основі графічних залежностей встановлено, що

найбільш значимим фактором, який впливає на середню густину розчинів виготовлених на основі ГЦШВ впливає витрата добавки поризатору UFAPORE CC85. Збільшення його вмісту до 0,4 % від маси в'язучого дозволяє знизити середню густину зразків в середньому на 20 %. При цьому середня густина зразків зменшується від 2000-2100 кг/м³ до 1600-1700 кг/м³, що відповідно призводить до значного зменшення теплопровідності. Також до деякого зменшення середньої густини зразків призводить збільшення водо-в'язучого відношення, що відповідно викликає збільшення загальної пористості затверділого бетону.

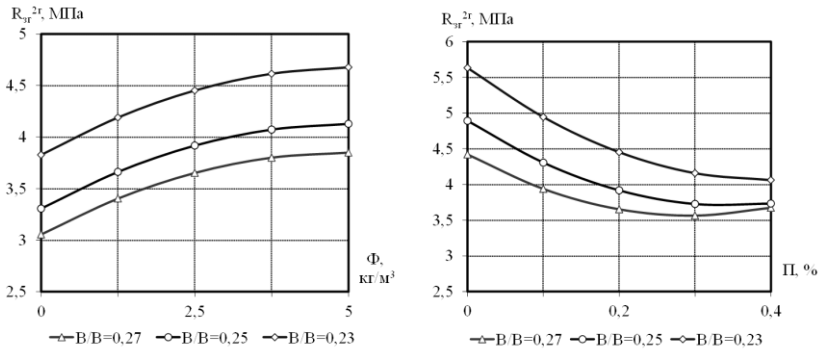


Рис. 2. Вплив варійованих факторів на міцність при згині розчинів виготовлених на основі ГЦШВ у віці 2 годин

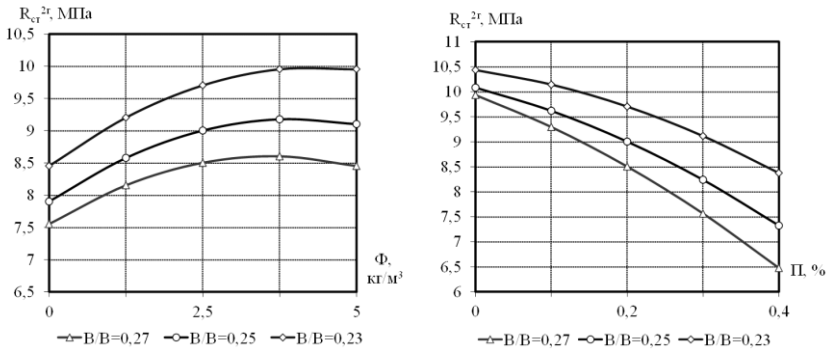


Рис. 3. Вплив варійованих факторів на міцність при стиску розчинів виготовлених на основі ГЦШВ у віці 2 годин

Характер впливу варійованих факторів на міцнісні характеристики розчинів виготовлених на основі ГЦШВ, як випливає з аналізу комплексу отриманих експериментально-статистичних моделей (табл. 3) та побудованих на їх основі графічних залежностей (рис. 2-5), суттєво не змінюється при збільшенні тривалості твердіння. До зниження міцності розчинів як на стиск

так і на згин призводить збільшення водо-в'язучого відношення та збільшення вмісту добавки-поризатора UFAPORE CC85, що основним чином пов'язано із різким збільшенням пористості зразків. Дещо знівелювати даний вплив дозволяє збільшення вмісту поліпропіленової фібри. Внаслідок трьохмірного дисперсного армування цементної матриці розчину волокнами фібри його міцність на розтяг при згині збільшується в середньому на 25 % у порівнянні з неармованими зразками. Збільшення вмісту фібри також позитивно впливає і на міцність при стиску. При цьому приріст міцності в середньому складає 15-20 %.

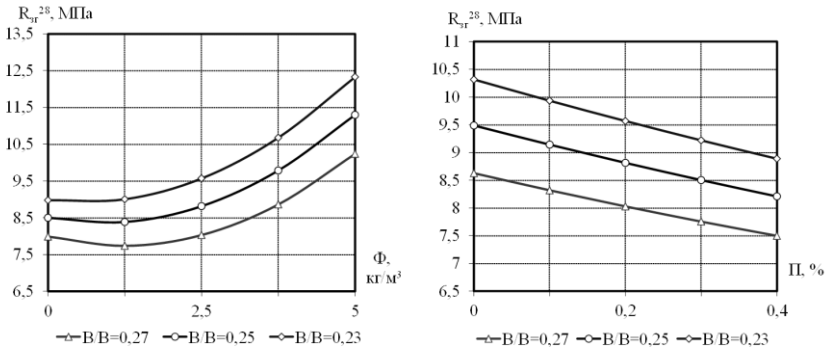


Рис. 4. Вплив варійованих факторів на міцність при згині розчинів виготовлених на онові ГЦШВ у віці 28 діб

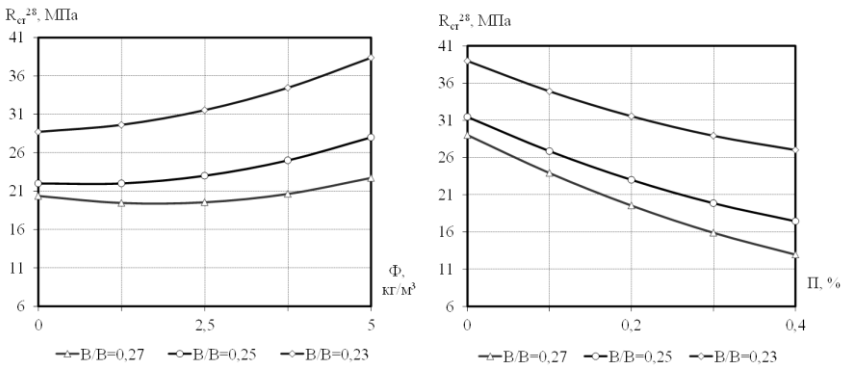


Рис. 5. Вплив варійованих факторів на міцність при стиску розчинів виготовлених на онові ГЦШВ у віці 28 діб

Отримані результати вказують на те, що на основі розроблених гіпсоцементношлакових в'язучих можна отримати швидкотверднучі розчинні композиції, які характеризуються підвищеною міцністю та

термічним опором і за своїми фізико-механічними характеристиками не поступаються звичайній керамічній цеглі.

Висновок. Таким чином, проведені дослідження показали можливість отримання на основі гіпсоцементношлакового в'язучого модифікованого добавкою гіперпластифікатора на полікорбоксилатній основі швидкотверднучих розчинових композицій, які можуть бути використані як робочі суміші для 3D принтера. На основі розроблених розчинових композицій можна виконувати швидкісне зведення будівель та споруд як військового так і цивільного призначення.

15. Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete. ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineer. 2013. Pp. V009T10A062-V009T10A062.
16. Warszawski A., Navon R. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects. Journal of Construction Engineering and Management. 1998. No.124(1). Pp. 31-41.
17. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. Sustainable Cities and Society. 2016. No.23. Pp. 78-93.
18. Зленко М.А. Аддитивные технологии в машиностроении / М.В. Нагайцев, В.М. Довбыш // пособие для инженеров. – М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ» 2015. 220 с.
19. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. Virtual and Physical Prototyping. 2016. T.11. No.3. Pp.209-225.
20. L. Xi-Qiang, L. Jing-Fang, Z. Tao, H. Liang, Z. Nan, L. Juan, L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: pat. CN104310918A. 2014.
21. Y. Tianrong, L. Qiaoling. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: pat. CN104891891A. 2015.
22. F. Peng, M. Xinmiao. Fiber reinforced composite material reinforced 3D (three-dimensional) printing structure: pat. CN104309126A. 2014.
23. L. Fu-Cai, W. Yi-Yuan, X. Min, L. Bin, Z. Xin-Zhen, H. Ming. High-performance powder concrete for 3D (three-dimensional) printing: pat. CN104961411A. 2015.
24. Khoshnevis B. Contour crafting extrusion nozzles: pat. US14/961,071. 2015.
25. Dini E. Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus therefor : pat. US8337736. 2012.
26. Dini E., Chiarugi M., Nannini R. Method and device for building automatically conglomerate structures : pat. 11/908,993 SShA. 2006.
27. Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? Procedia Engineering. 2016. No. 151. Pp. 292-299.
28. Lloret E. et al. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. Computer-Aided Design. 2015. No.60. Pp. 40-49.
29. Le T. T. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. Cement and Concrete Research. 2012. T. 42. No. 3. Pp. 558-566.
30. Le T. T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. Materials and structures. 2012. T. 45. No. 8. Pp. 1221-1232.

31. Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. Т. 1. No. 3. Pp. 301-320.
 32. Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012. No. 21. Pp. 262-268.
 33. Malaeb Z. et al. 3D Concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*. 2015. Т. 6. No. 6.
 34. Baehr D. O., Izard D. G. Method for the production of glass fiber-reinforced gypsum sheets and gypsum board formed therefrom : pat. 4265979 SShA. 1981.
 35. Серых И.Р., Панченко Л.А. Прочность скелетофибробетона Научные труды Sworld. 2014. № 9.
 36. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение). Справочник. Под общей ред. А.В. Ферронской. – М.: Издательство АСВ. – 488 с.
 37. Патент України № 43242 С04В 28/14 (2009.01).
 38. Дворкін Л.Й. Швидкотверднучі розчинні композиції/ Ю.О. Степасюк, Л. Й. Дворкін, Баран О.М., Механчук В.М.// Ресурсоєкономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Збірник наукових праць. – Рівне, 2018. Вип. 35.- С. 10-17. ISSN 2218-1873.
 39. L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov, *Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology*, Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, 2012, 173.
-
1. Di Carlo T., Khoshnevis B., Carlson A. Experimental And Numerical Techniques To Characterize Structural Properties Of Fresh Concrete. *ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. American Society of Mechanical Engineer. 2013. Pp. V009T10A062-V009T10A062.
 2. Warszawski A., Navon R. Implementation of robotics in building: Current status and future prospects. *Journal of Construction Engineering and Management*. 1998. No.124(1). Pp. 31-41.
 3. Ibrahim M. I. M. Estimating the sustainability returns of recycling construction waste from building projects. *Sustainable Cities and Society*. 2016. No.23. Pp. 78-93.
 4. Zlenko M.A. Addyuvnyye tekhnolohyy v mashynostroeny / M.V. Nahaitsev, V.M. Dovbysh // posobyе dlia ynzhenrov. – М. HNTs RF FHUP «NAMU» 2015. 220 s.
 5. Bos F. et al. Additive manufacturing of concrete in construction: potentials and challenges of 3D concrete printing. *Virtual and Physical Prototyping*. 2016. Т.11. No.3. Pp.209-225.
 6. L. Xi-Qiang, L. Jing-Fang, Z. Tao, H. Liang, Z. Nan, L. Juan, L. Guoyou. Cement-based composite material used for 3D printing technology as well as preparation method and application thereof: pat. CN104310918A. 2014.
 7. Y. Tianrong, L. Qiaoling. 3D printing cement-based material and preparation method thereof: pat. CN104891891A. 2015.
 8. F. Peng, M. Xinmiao. Fiber reinforced composite material reinforced 3D (three-dimensional) printing structure: pat. CN104309126A. 2014.
 9. L. Fu-Cai, W. Yi-Yuan, X. Min, L. Bin, Z. Xin-Zhen, H. Ming. High-performance powder concrete for 3D (three-dimensional) printing: pat. CN104961411A. 2015.
 10. Khoshnevis B. Contour crafting extrusion nozzles: pat. US14/961,071. 2015.
 11. Dini E. Method for automatically producing a conglomerate structure and apparatus thereof : pat. US8337736. 2012.

- 12.** Dini E., Chiarugi M., Nannini R. Method and device for building automatically conglomerate structures : pat. 11/908,993 SShA. 2006.
- 13.** Hager I., Golonka A., Putanowicz R. 3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction? *Procedia Engineering*. 2016. No. 151. Pp. 292-299.
- 14.** Lloret E. et al. Complex concrete structures: Merging existing casting techniques with digital fabrication. *Computer-Aided Design*. 2015. No.60. Pp. 40-49.
- 15.** Le T. T. et al. Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*. 2012. T. 42. No. 3. Pp. 558-566.
- 16.** Le T. T. et al. Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and structures*. 2012. T. 45. No. 8. Pp. 1221-1232.
- 17.** Khoshnevis B. et al. Mega-scale fabrication by contour crafting. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*. 2006. T. 1. No. 3. Pp. 301-320.
- 18.** Lim S. et al. Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in construction*. 2012. No. 21. Pp. 262-268.
- 19.** Malaeb Z. et al. 3D Concrete printing: machine and mix design. *International Journal of Civil Engineering*. 2015. T. 6. No. 6.
- 20.** Baehr D. O., Izard D. G. Method for the production of glass fiber-reinforced gypsum sheets and gypsum board formed therefrom : pat. 4265979 SShA. 1981.
- 21.** Серы́ikh Y.R., Panchenko L.A. Prochnost skelofybrobetona *Научные труды Sworld*. 2014. № 9.
- 22.** Нурсовы́е материалы́ у́зделья́ (про́изводст́во у́ пры́менен́е). *Справочник. Под обшче́й ред. А.В. Ферро́нско́й*. – М.: *Йзда́телст́во АСВ*. – 488 с.
- 23.** Patent Ukrainy № 43242 S04V 28/14 (2009.01). Dvorkin L.I. Shvydkotverdnuchi rozchynovi kompozytsii / Yu. O. Stepasiuk, L. Y. Dvorkin, Baran O.M., Mekhanchuk V.M.// *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy. Zbirnyk naukovykh prats.* – Rivne, 2018. Vyp. 35.- S. 10-17. ISSN 2218-1873.
- 40.** L. Dvorkin, O. Dvorkin, Y. Ribakov, *Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology*, Nova Science Publishers, Inc., New York, USA, 2012, 173.

ТЕХНОЛОГІЇ ТА ВИКОРИСТАННЯ НАНОСИСТЕМ У ВИРОБНИЦТВІ БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

TECHNOLOGIES AND USE OF NANOSYSTEMS IN MANUFACTURING OF BUILDING MATERIALS

Дерев'янко В. Н., д.т.н., проф. ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» / *Dr. Sc. (Tech.), Prof. Derevianko V. N.*, PHEI «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», ORCID ID 0000-0002-2537-4389, **Кушнерова Л. О.**, к.т.н., доц. ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» / *Ph.D., Assoc. Prof. Kushnerova L. O.*, PHEI «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», ORCID ID 0000-0003-0759-8050, **Мороз Л. В.**, к.т.н., доц. Дніпровський державний аграрно-економічний університет / *Ph.D., Assoc. Prof. Moroz L. V.*, Dnipro State Agrarian-Economic University, ORCID ID 0000-0003-3150-7472, **Мороз В. Ю.**, аспір. ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» / *postgraduate student Moroz V. Y.* PHEI «Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture», ORCID ID 0000-0003-2435-8050

В статті виділено головні дослідження нанотехнологій в сфері будівельних матеріалів пов'язані з вивченням наноструктур, застосуванням наночастинок, вуглецевих нанотрубок з метою спрямованого регулювання властивостей в'язучих матеріалів. Сформульовано перспективний напрямок досліджень, що дозволить розширити сферу застосування гіпсових в'язучих. Визначено мету таких досліджень та план їх проведення.

Actual use of nanotechnology in construction is quite limited in Ukraine. Achievements, that are using now, are associated with unique strength characteristics, new types of reinforcing steels, unique films for covering structures and more. These innovative ideas focus on surface effects and do not sufficiently consider the new building materials structure. The article analyzes the literature of nanotechnologies using and nanomaterials in the building materials production. The main nanotechnology researches in the field of building materials are related with the nanostructures studying, the use of nanoparticles and carbon nanotubes for directional control of the binders properties, safety problems and environmental impact are highlighted. The possibilities of gypsum binders are far from exhausted and can be realized on a qualitatively different level. Products are based on

gypsum binder meet all modern requirements for fire resistance, sound absorption, environmental safety and energy conservation at all stages of the life cycle. A promising research direction that will expand the scope of gypsum binders has been formulated. A researches promising line that will expand the scope of gypsum binders is formulated. The main purpose of the researches, will be conducted, is the carbon nanotubes using in aqueous surfactants to modify gypsum binder in order to enhance the physical and technical characteristics of concrete is based on modified binder. Research planning for regulating internal stresses during the hardening process and increasing the water resistance of gypsum should include several stages. First, determine the location of two-water gypsum in the product, where its concentration is higher and what it is related to. Secondly, the use of additives of plasticizers to reduce water consumption of gypsum binder, in order to obtain a denser structure of gypsum, which in turn will improve the water resistance of gypsum. And also, growing crystals with the various additives introduction in order to learn how to influence on the direction of growth and crystal shape.

Ключові слова: наносистеми, матеріали, нанотрубки, в'язучі, дослідження.
Nanosystems, materials, nanotubes, binders, research

Вступ. Матеріали зі зміненими стандартними властивостями, що мають підвищену якість та покращену структуру за рахунок використання нанотехнологій, використовують близько 20% будівельних компаній в США, Японії, Китаї та країнах Європи.

В 2003 році в Римі за проектом американського дизайнера було збудовано церкву зі збірного залізобетону та скла. Вигнуті конструкції цієї споруди нагадують пелюстки квітки. Особливість конструкції полягає в тому, що стіни будівлі є білосніжними та самоочищаються. Такий ефект був досягнутий за рахунок додавання до складу цементу наночасток діоксиду титану. Аналогічний цемент був використаний при будівництві пам'ятника жертвам Голокосту в Берліні в 2005 році. Ще один експериментальний проект – Великий національний театр в Пекіні, скляна поверхня купола якого завжди прозора, тому, що покрита тонкою плівкою з каталізатора діоксиду титану. Серед аналогічних рішень можна також виділити нанопористе покриття стін Шанхайського музею науки та технології, що дозволяє зберігати тепло взимку і прохолоду влітку [1]. Ці досягнення стали можливі завдяки використанню нанотехнологій при виробництві будівельних матеріалів.

Аналіз останніх джерел. Поняття нанотехнології у світі пов'язане з такими вченими як Р. Фейман, З. Дрекслер, Н. Танигучи, М. Саперно, Д. Лінтона, Т. Волша та інших [2-3].

За останні два десятиліття виріс інтерес до нанотехнологій і в Україні. Про це свідчить кількість публікацій, видань та матеріалів конференцій, що з'явилися за цей час. Так у [4] висвітлено проблеми використання наноструктурних функціональних плівок, покриттів і наноматеріалів у промисловості. Опис наноструктур на основі вуглецю – фулеренів та нанотрубок викладено у роботі [5], розкрито основи сучасних технологій вирощування тонких плівок, квантово-розмірних шарів, квантових ниток і точок, фулеренів та нанотрубок. Результати досліджень з нанотехнологій, призначених для створення наноструктурованих матеріалів переважно конструкційного та функціонального призначення на основі аналізу зарубіжних і вітчизняних наукових джерел за 1974-2009рр. висвітлено у роботі [6]. Результати теоретичних та експериментальних досліджень будови та властивостей нанорозмірних систем, розмірних ефектів та самоорганізації наноструктур, розробки методів отримання металів, сплавів, кераміки, композитів і напівпровідникових систем у наноструктурованому стані, вуглецевих наноматеріалів, плівок, покриттів і поверхневих наносистем представлено у роботі [7]. Основні характеристики наноматеріалів, технології їх отримання та обробки, методи досліджень, структура та фізико-механічні властивості викладено у роботі [8]. Історію нанотехнологій, методи отримання наноматеріалів і наноструктур, питання пов'язані з особливостями застосування нанотехнологій в будівництві представлено у роботі [9].

Основний матеріал. Разом з тим фактичне використання нанотехнологій у будівництві є досить обмеженим в Україні. Досягнення, що використовуються зараз пов'язані з унікальними характеристиками міцності, новими видами арматурних сталей, унікальними плівками для покриття конструкцій тощо. Ці інноваційні ідеї орієнтовані на поверхневі ефекти та мало висвітлюють структуру нових будівельних матеріалів.

Початок розгляду наноматеріалів пов'язаний з класифікацією робіт в цьому напрямку – теоретичні та емпіричні роботи. До теоретичних загалом можна віднести роботи з визначення умов ефективної реалізації нанотехнологій в будівельному матеріалознавстві або роботи з аналітики різноманітних явищ та процесів, що виникають при впровадженні нанотехнологій. Емпіричні роботи, по суті формують базу даних про ефективність застосування як початкових наноматеріалів так і технологічних прийомів виготовлення матеріалів, що містять нанооб'єкти [10]. Ця класифікація виконана на основі аналізу 170 статей та представляє собою структурований підхід до способів керування структуроутворенням матеріалів з додаванням наночасток різної хімічної природи та до методів активації і механізмів модифікації матеріалів [11].

Результати проведених досліджень [12] дозволяють виділити три головних сегмента нанотехнологій в будівництві:

- виробництво будівельних матеріалів, що включає технології, що дозволяють знизити вартість нанопродуктів;
- експлуатація, що дозволяє зменшити експлуатаційні витрати та досягти певних властивостей матеріалів, що не можуть бути отримані за допомогою звичайних технологій.

Нанотехнології в будівництві замінили традиційні методи покращення властивостей будівельних матеріалів, що використовувалися раніше – зміна складу та технологічних режимів обробки сировини [13].

Ще нещодавно головною метою нанотехнологічних рішень в бетоні було отримання високоміцного бетону з терміном придатності 300-500 років, який можна використовувати для будівництва хмарочосів, мостів тощо. За для цього поряд з традиційними способами регулювання структури бетону використовували модифікацію бетонів нанорозмірними частинками, за рахунок яких відбувається структурування мінеральної матриці в'язучого [14-15].

Бетон може бути розроблений на нанорівні шляхом додавання нанорозмірних блоків або об'єктів для керування роботою матеріалу та отримання нових властивостей, а також шляхом вживлення молекул у цементну матрицю, заповнювачі або добавки для забезпечення функціональності поверхні, яка може сприяти покращенню граничних взаємодій [16].

У [16] зазначено велику кількість робіт по визначенню впливу нанокварца, часток глини, нанозаліза і наноалюмінія, оксидів нанотитану на властивості різних матеріалів, з метою отримання гібридних, органічних, що цементують нанокомпозитів. Також за останні роки зріс інтерес до моделювання структури C-S-H на атомарному рівні, взаємодії води і розчинів в різних цементних фазах, походженням цементування в цементних фазах і зовсім недавно, до контролю механічної міцності цементних систем шляхом створення пов'язаної схеми в C-S-H і молекулярної взаємодії з графітовим армуванням.

Сьогодні головні дослідження нанотехнологій в сфері будівельних матеріалів пов'язані з вивченням наноструктур, застосуванням наночастинок, вуглецевих нанотрубок з метою спрямованого регулювання властивостей в'язучих матеріалів, проблемами безпеки та впливом на зовнішнє середовище [12]. Більшість досліджень з використання принципів нанотехнологій в бетоні зосереджені на структуруванні цементних матеріалів та на вивчення механізму їх руйнування [17-19].

Однак не менш перспективними є дослідження гіпсових в'язучих. Можливості гіпсових в'язучих далеко не вичерпані і можуть бути реалізовані на якісно іншому рівні. Вироби на основі гіпсового в'язучого відповідають всім сучасним вимогам по вогнестійкості, звукопоглинанню, екологічній безпеці та енергозбереженню на всіх етапах життєвого циклу.

Слід також зауважити, що гіпсові в'язучі мають і ряд недоліків, які значно обмежують область його застосування. До їх числа відносять низькі показники по водостійкості, морозостійкості і міцності, що не дозволяють забезпечити необхідну довговічність зовнішніх конструкцій.

Тому підвищення ефективності гіпсових в'язучих шляхом їх наномодифікації є актуальним завданням, це дозволить створити нове покоління водостійких гіпсових в'язучих підвищеної міцності, що дозволить розширити їх сферу застосування. Широке впровадження в практику будівництва гіпсових в'язучих дозволить потіснити такий вид в'язучого, як цемент, що в свою чергу сприятиме економії енергоресурсів, підвищення економічної ефективності в'язучих, створення енергозберігаючих технологій їх отримання.

Відповідно до експериментальних даних (глибокі дослідження твердіння гіпсу П.А. Ребіндера, Е.Е. Сегалової, А.Ф. Полака, В.Б. Ратинова і ін.) розвиток структури твердіння гіпсу протікає в два етапи. Протягом першого формується каркас кристалізаційної структури з виникненням контактів зрощення між кристалами новоутворень. Протягом другого етапу відбувається обростання каркаса і зростання складових його кристалів. Це призводить до підвищення міцності, але за певних умов може бути і причиною появи внутрішніх напружень.

Найбільша кінцева міцність обумовлюється виникненням кристалів новоутворень достатньої величини при мінімальних напругах, які супроводжують формування і розвиток кристалізаційної структури. [20]

Висновки

Підвищення показників міцності гіпсу можливо за рахунок зниження або повного усунення внутрішніх напружень, які виникають в процесі твердіння гіпсу. Зняття внутрішніх напружень можливо досягти шляхом контрольованого росту кристалів в заданому напрямку.

Основна мета досліджень, що будуть проведені - використання вуглецевих нанотрубок в водному розчині поверхнево-активних речовин для модифікації гіпсового в'язучого з метою підвищення фізико-технічних характеристик бетонів на основі модифікованого в'язучого.

План досліджень з усунення або зниження внутрішніх напружень в процесі твердіння гіпсу і підвищенню водостійкості має включати наступні етапи:

1. Визначити, як розташовується двуводний гіпс в об'ємі виробу, де його концентрація вище і з чим це пов'язано.
2. Виявити зміни внутрішньої напруги при введенні нанотрубок в матрицю гіпсового в'язучого.

3. Застосувати добавки пластифікатори для зниження водопотреби гіпсового в'язучого, з метою отримання більш щільної структури гіпсу, що в свою чергу дозволить підвищити водостійкість гіпсу.

4. Вирощування кристалів з введенням різних добавок, з метою навчитися впливати на напрямок росту кристалів і на їх форму.

1. Нанотехнології в будівництві та архітектурі / Російські нанотехнології . - №1-2. – 2010р.
2. Системи технологій / В. І. Сігачова, В. І. Пчелінцев, А. Ф. Будник, О. Й. Любич // Навчальний посібник. – Суми: РВВ СУМДУ. – 2008 – 200с.
3. Фесенко О.М., Ковальчук С.В., Ницик Р.А. / Проблеми та перспективи розвитку нанотехнологій в Україні та світі // О. М. Фесенко, С. В. Ковальчук, Р. А. Ницик . – Маркетинг і менеджмент інновацій . - №1. – 2017. – с. 170-179
4. Збірка доповідей Харківської нанотехнологічної асамблеї – 2008 / під ред. І. М. Неклюдов // Харків. – 2008. – Т.2: Наноматеріали. – 232с.
5. Заячук Д. М. Нанотехнології і наноструктури / Д. М. Заячук // Львівська політехніка . – Львів. – 2009. – 580с.
6. Ковтун Г. П. Наноматеріали: технології та матеріалознавство / Г. П. Ковтун, А. А. Веревкін // Харківський фізико-технічний інститут. – Харків . -2010. – 73с.
7. Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології / тези 4 Міжнародної наукової конференції: НАН України. – Київ. – 2013. -578с.
8. Наноматеріали та нанотехнології / В. А. Богуслаєв, А. Я. Качан, Н.Е. Калініна та інші // Запоріжжя: Мотор Січ. – 2014 -207с.
9. Присяжна О. В. Основи нанотехнологій функціональних та конструкційних матеріалів / О. В. Присяжна // Київський національний університет будівництва та архітектури. – Київ: КНУБА. – 2014. – 179с.
10. Корольов Е. В. Нанотехнології в будівельному матеріалознавстві. Аналіз стану та досягнень. Шляхи розвитку / Е. В. Корольов // Будівельні матеріали. - №11. – 2014. – с. 47-77.
11. Хозин В. Г., Абдрахманова Л. А., Низамов Р. К. Загальна концентраційна залежність ефектів наномодифікування будівельних матеріалів / В. Г. Хозин, Л. А. Абдрахманова, Р. К. Низамов // Будівельні матеріали. - №2. – 2015. – с.25-33
12. Кондратьєва Н. В. Нанотехнології в виробництві будівельних матеріалів / Н. В. Кондратьєва // Будівництво України. - №6. – 2012. – С. 2-8
13. Бердов Г. І., Зірянова В.Н., Машкін А. М., Хрітанков В. Ф. Нанопроцеси в технології будівельних матеріалів / Г. І. Бердов, В. Н. Зірянова, А. М. Машкін, В. Ф. Хрітанков // Будівельні матеріали. - №7. – 2008. – с.76-80
14. Езерський В. А., Монастирьов П. В., Кузнєцова Н. В., Стрехов І. І. Перспективи застосування наномодифікованого бетону / В. А. Езерський, П. В. Монастирьов, Н. В. Кузнєцова, І. І. Стрехов // Будівельні матеріали. - №9. – 2011. – с.70-71.
15. Явруян Х. С., Філонов І. А., Фесенко Д. А. До питання застосування нанотехнологій в виробництві будівельних матеріалів / Х. С. Явруян, І. А. Філонов, Д. А. Фесенко // Інженерний вістник Дону. - №3. – 2012. – с. 801-804.
16. Соболев К, Санчез Ф. Нанотехнології в виробництві бетонів. Обзор. / К. Соболев, Ф. Санчез // Вісник ТГАСУ. - №3. – 2013. – с. 262-289

17. Фалікман В. Р. Наноматеріали та нанотехнології в сучасних бетонах / В. Р. Фалікман // Промислове та громадське будівництво. - №1. – 2013. – с.31 – 34
18. Фалікман В. Р., Баженов Ю. М., Булгаков Б. І. Наноматеріали та нанотехнології в сучасній технології бетонів / В. Р. Фалікман, Ю. М. Баженов, Б. І. Булгаков // Вісник МГСУ. - №12. – 2012. – с. 125-133.
19. Артамонова О. В., Чернишов Е.М. Концепції та основи технологій наномодифікування структур будівельних матеріалів / О. В. Артамонова, Е. М. Чернишов // Будівельні матеріали №9. – 2013. – с. 82-90.
20. Большаков В.И., Дворкин Л.И. / Строительное материаловедение // Днепропетровск РВА «Дніпро-VAL». -2004. –с.182
1. Nanotekhnologii v budivnytstvi ta arkhitekturi / Rosiiski nanotekhnologii . - №1-2. – 2010r.
2. Systemy tekhnologii / V. I. Sihachova, V. I. Pchelintsev, A. F. Budnyk, O. Y. Liubych // Navchalnyi posibnyk. – Sumy: RVV SUMDU. – 2008 – 200s.
3. Fesenko O.M., Kovalchuk S.V., Nytsyk R.A. / Problemy ta perspektyvy rozvytku nanotekhnolohiy v Ukraini ta sviti // O. M. Fesenko, S. V. Kovalchuk, R. A. Nytsyk . – Marketynh i menedzhment innovatsii . - №1. – 2017. – s. 170-179
4. Zbirka dopovidei Kharkivskoi nanotekhnolohichnoi asamblei – 2008 / pid red. I. M. Nekliudov // Kharkiv. – 2008. – T.2: Nanomaterialy. – 232s.
5. Zaiachuk D. M. Nanotekhnologii i nanostruktury / D. M. Zaiachuk // Lvivska politekhnikha . – Lviv. – 2009. – 580s.
6. Kovtun H. P. Nanomaterialy: tekhnologii ta materialoznavstvo / H. P. Kovtun, A. A. Verevkin // Kharkivskiy fizyko-tekhnichniy instytut. – Kharkiv . -2010. – 73s.
7. Nanorozmirni systemy: budova, vlastyivosti, tekhnologii / tezy 4 Mizhnarodnoi naukovoï konferentsii: NAN Ukrainy. – Kyiv. – 2013. -578s.
8. Nanomaterialy ta nanotekhnologii / V. A. Bohuslaiev, A. Ya. Kachan, N.E. Kalinina ta inshi // Zaporizhzhia: Motor Sich. – 2014 -207s.
9. Prysiazhna O. V. Osnovy nanotekhnolohiyi funktsionalnykh ta konstruktsiinykh materialiv / O. V. Prysiazhna // Kyivskiy natsionalnyi universytet budivnytstva ta arkhitektury. – Kyiv: KNUBA. – 2014. – 179s.
10. Korolov E. V. Nanotekhnologii v budivelnomu materialoznavstvi. Analiz stanu ta dosiahnen. Shliakhy rozvytku / E. V. Korolov // Budivelni materialy. - №11. – 2014. – s. 47-77.
11. Khozyn V. H., Abdrakhmanova L. A., Nyzamov R. K. Zahalna kontsentratsiina zalezhnist efektyv nanomodyfikuvannya budivelnykh materialiv / V. H. Khozyn, L. A. Abdrakhmanova, R. K. Nyzamov // Budivelni materialy. - №2. – 2015. – s.25-33
12. Kondratieva N. V. Nanotekhnologii v vyrobnytstvi budivelnykh materialiv / N. V. Kondratieva // Budivnytstvo Ukrainy. - №6. – 2012. – S. 2-8
13. Berdov H. I., Zirianova V.N., Mashkin A. M., Khritankov V. F. Nanoprotsesy v tekhnologii budivelnykh materialiv / H. I. Berdov, V. N. Zirianova, A. M. Mashkin, V. F. Khritankov // Budivelni materialy. - №7. – 2008. – s.76-80
14. Ezerskyi V. A., Monastyrov P. V., Kuznietsova N. V., Striekhov I. I. Perspektyvy zastosuvannya nanomodyfikovanoho betonu / V. A. Ezerskyi, P. V. Monastyrov, N. V. Kuznietsova, I. I. Striekhov // Budivelni materialy. - №9. – 2011. – s.70-71.

- 15.** Iavruian Kh. S., Filonov I. A., Fesenko D. A. Do pytannia zastosuvannia nanotekhnologii v vyrobnytstvi budivelnykh materialiv / Kh. S. Yavruian, I. A. Filonov, D. A. Fesenko // Inzhenernyi vistnyk Donu. - №3. – 2012. – s. 801-804.
- 16.** Soboliev K, Sanchez F. Nanotekhnologii v vyrobnytstvi betoniv. Obzor. / K. Soboliev, F. Sanchez // Visnyk THASU. - №3. – 2013. – s. 262-289
- 17.** Falikman V. R. Nanomaterialy ta nanotekhnologii v suchasnykh betonakh / V. R. Falikman // Promyslove ta hromadske budivnytstvo. - №1. – 2013. – s.31 – 34
- 18.** Falikman V. R., Bazhenov Yu. M., Bulhakov B. I. Nanomaterialy ta nanotekhnologii v suchasni tekhnologii betoniv / V. R. Falikman, Yu. M. Bazhenov, B. I. Bulhakov // Visnyk MHSU. - №12. – 2012. – s. 125-133.
- 19.** Artamonova O. V., Chernyshov E.M. Kontseptsii ta osnovy tekhnologii nanomodyfikuvannia struktur budivelnykh materialiv / O. V. Artamonova, E. M. Chernyshov // Budivelni materialy №9. – 2013. – s. 82-90
- 20.** Bolshakov V.Y., Dvorkyn L.Y. / Stroytelnoe materialovedenye // Dnepropetrovsk RVA «Dnipro-VAL».-2004. –s.182

ВОДОПОГЛИНАННЯ, ЯК ФУНКЦІЯ СКЛАДІВ ДЕКОРАТИВНИХ БЕТОНІВ

WATER ABSORPTION, AS A FUNCTION OF COMPOSITIONS OF DECORATIVE CONCRETES

Довгань О.Д.¹, к.т.н., доц., ORCID: 0000-0002-6140-3159, **Вировой В.М.**¹, д.т.н., проф., **Довгань П.М.**² (¹Одеська державна академія будівництва та архітектури, ²ПП «Портал Юг», м. Одеса)

Dovgan A.D., PhD, As.Prof., ORCID: 0000-0002-6140-3159, **Vyrovoy V.M.**¹, **D.Sc., Prof., Dovgan P.M.**² (¹Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, ²Portal Ug, Odessa)

Представлені результати дослідження впливу рецептурних факторів на будову пористого простору декоративних бетонів. Знизити водопоглинання композиту можливо за рахунок використання модифікуючих добавок і волокнистих наповнювачів.

Water absorption as function of compositions of a decorative composite substantially depends on structural registration, which is determined by qualitative and quantitative content of organo-mineral additives and a ratio of quartz grains of fine and coarse sand. Calculated differential parameters of the structure of porous space show – the plasticized concrete is characterized by big heterogeneity of a pores by sizes, speed of saturation of samples water during an initial period (till 6 h inclusive) much more, than during the period following. Numerous values of microporosity coefficient show, the porosity of composites more than for 39% is presented by micropores. The objectivity of submissions of the porous space structure is confirmed by optical researches. As shown, there has been much smaller amount of a macropores and the largest heterogeneity of pores by sizes and, particularly, in such structure of porous space of these compositions of concrete samples mechanical characteristics in a water-saturated state are significantly higher in highplasticized compositions of solutions on coarse-grained sand. A rather high-correlation connection of water absorption of samples for volume and with capillary water absorption was revealed, in different periods of their saturation, from W/C and density of 27 concrete compositions. Analysis of the 5-factor diagrams of "Cubes on a square", constructed for experimental statistical models W demonstrated, the composites, which provide minimum water absorption levels by weight W_M and capillary water absorption of W_k differ in composition. In turn, the minimum values of parameters are obtained for W_M with medium and above average dosages of superplasticizer

and fibers 6 and 12 mm long, respectively for W_k – on high-plasticized structures of concrete reinforced with a maximum level of fibers only 12 mm long. It is planned to find a multi-criteria compromise between the best levels of certain optimality criteria, provided that the requirements for other criteria are met.

Ключові слова: декоративний бетон, цеоліт, суперпластифікатор, скляне волокно, водопоглинання, експериментально-статистична модель.
Decorative concrete, zeolite, superplasticiser, glass fibre, water absorption, porosity, experimental-statistical model.

Вступ. Довговічність композиційних будівельних матеріалів визначається багатьма факторами, починаючи від технологічних і управляючих [1, 2] та закінчуючи умовами експлуатації готової продукції. Для виробів, що працюють під агресивним впливом навколишнього середовища, одним із визначальних чинників, обумовлюючих здатність зберігати встановлені характеристики в певних межах протягом заданого часу, є водопоглинання. Задача зниження водопоглинання набуває особливого значення для тонкостінних виробів з дрібнозернистих (піщаних) бетонів. Оскільки, в силу специфічності структури, ці бетони характеризуються високим вмістом цементного каменю, підвищеною сумарною питомою поверхнею заповнювачів, відповідно, збільшеною кількістю поверхонь розділу між зернами дисперсної фази [3]. Відомо, в зоні контакту щільність структури цементного каменю значно менша, зокрема внаслідок неповного заповнення міжзернового простору твердою фазою. За даними роботи [4], загальна пористість контактної зони у 2.5-3.5 рази вища пористості цементного каменю. Отже властивості дрібнозернистих композитів напряму залежать від кількості та якості новоутворень цементного каменю, капілярно-пористого простору, а також якісних і кількісних характеристик заповнювачів.

Відповідно до ДСТУ Б.А.1.1-5-94 степінь водопоглинання матеріалу характеризується здатністю вбирати і затримувати в собі воду, і головним чином змінюється в залежності від об'єму пор, їх виду і розмірів. При безпосередньому контакті бетону з водою, насичення його відбувається в результаті капілярного підсосу, осмотичної міграції води і під впливом гідростатичного тиску [5]. Після насичення водою експлуатаційні властивості цементного композиту, внаслідок порушення зв'язків між його складовими, суттєво змінюються. Це зумовлено тим, що такі характеристики як міцність, морозостійкість, корозійна стійкість напряму залежать від характеру процесу водопоглинання і розподілення в ньому вологи.

Важливою задачею при розробці складів декоративних бетонів є зниження пористості, та, як наслідок, підвищення їх міцності та морозостійкості. При вирішенні даної задачі важливо враховувати і

кліматичні характеристики районів експлуатації архітектурних елементів (циклічні зміни температури навколишнього середовища з переходом до від'ємних значень, зміну вологості повітря, концентрацію CO₂ тощо).

Аналіз останніх досліджень. З метою покращення фізико-механічних властивостей композиційних матеріалів науковцями пропонується використання високодисперсних добавок [2, 6-7] різного складу спільно з ефективними суперпластифікаторами [3, 8-9], оскільки наповнювачі відіграють важливу роль у структуроутворенні цементного каменю виходячи із топологічного аналізу. Понижуючи вміст портландиту в загальній масі новоутворень, наповнювачі, таким чином, сприяють зміцненню контактної зони між цементним каменем і заповнювачами. Проте, структуроутворюючу функцію наповнювача в цементних в'язучих необхідно розглядати зокрема у взаємозв'язку з вихідною міцністю самого в'язучого та з його реакційно-хімічною активністю.

Вплив модифікаторів цементної матриці, гібридних волокон та гранулометрії пісків на характеристики пластичної та механічної міцності декоративних композитів було показано в статтях [10-12]. Отримані в цих дослідженнях експериментально-статистичні моделі (ЕС-моделі) [13] дозволили виявити, що заміна в'язучого цеолітом в кількості 8 % і введення волокон пришвидшують процес початкового структуроутворення розчинів [10]. Ефекти впливу факторів складу на механічні властивості бетону (f_{cm} , f_{cfm}), під час перебування його в рівноважному, сухому та водонасиченому станах, різні [11-12]. Композити, що забезпечують максимальні рівні механічних характеристик, відрізняються. Варто зауважити, формування високоміцної структури дрібнозернистого бетону, який виготовляється на місцевих пісках з природньою гранулометрією, можливо не лише за рахунок модифікування його цементної системи різними добавками, але й шляхом механоактивації композицій [14] на етапі приготування й ефективної укладки, наприклад, методами віброущільнення чи/та центрифугування.

Мета дослідження: знизити водопоглинання дрібнозернистого бетону, виготовленого на цементі з високою питомою поверхнею і підвищеним вмістом C₃A, за рахунок використання модифікуючих добавок і технологічних прийомів виробництва.

Матеріали та методи досліджень. В роботі виконана оцінка фізичних характеристик 27-ми різних складів бетону, модифікованих і дисперсно-армованих 5-ма компонентами X_i. Залежно від характеру їх дії на дрібнозернистий композит, при обліку тривірневих дозувань X_{i0} ± ΔX_i [13] варійованої сировини, рецептурні фактори складу [10] об'єднані в дві групи.

В першу групу входять фактори *модифікації* цементно-піщаної системи:

– тонкодисперсний цеоліт в кількості X₁(Z) = 4±4 м.ч., вводився взамін частини цементу;

- доля дрібнозернистого піску в суміші з крупнозернистим склала $X_2(GS) = 50 \pm 20$ м.ч. Використовувалися піски з природною гранулометриєю;
- суперпластифікатор на полікарбоксилатній основі вводився в кількості $X_3(MF) = 0.5 \pm 0.2$ м.ч. від маси в'язучої речовини.

Другу групу склали *параметри дисперсного армування* композиту:

- лугостійкі скляні волокна ($l = 6$ і 12 мм), дозування яких відповідали рівням $X_4(F6) = X_5(F12) = 0.015 \pm 0.015$ м.ч. (до маси розчинної суміші).

В натурному експерименті зафіксовано цементно-піщане співвідношення 1:3.4 за масою суміші. В якості цементного в'язучого використовувався білий портландцемент (100 м.ч.) марки СЕМ І 52.5 R. Перехід варійованих факторів до нормалізованих перемінних $1 \leq x_i \leq +1$ виконано за типовими формулами [13].

Склади декоративних композицій приготовлені з різним водо-цементним співвідношенням, при якому забезпечувалося виконання вимоги однакової легкоукладальності композицій – марки S4.

Виготовлення і випробовування зразків композиту здійснювалося відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б В.2.7-239:2010.

Аналіз результатів досліджень. Проведений аналіз експериментальних даних показав – зміна водопоглинання за масою W_M для більшості складів композитів спостерігається після 15 хвилин їх замочування. В подальшому інтенсивність насичення значно знижується, хоча при більш тривалому експонуванні зразків у середовищі W_M поступово зростає.

На рис. 1 приведені узагальнюючі результати кінетики водопоглинання за масою. Отримані криві побудовані по екстремальним і середнім значенням W_M (в часі τ) розчинів. Після побудови графіків виявлена явна асиметрія розташування середньої кривої по відношенню до границь ($W_{M,max}$ і $W_{M,min}$). Границя $W_{M,max}$ у 2.4 рази віддалена від середньої ніж $W_{M,min}$, але надалі починає зменшуватися. Це можна пояснити тільки значною відмінністю капілярно-пористого простору досліджуваних композитів, що характеризуються різним якісним і кількісним складом структурних елементів. Оскільки відомо, що чим більша неоднорідність капілярів за розміром і характером, тим більше буде зростати швидкість насичення матеріалу на першій ділянці та відповідно зменшуватися на другій. У зв'язку з цим, згідно з ДСТУ Б В.2.7-170:2008 та [1] за кінетикою водопоглинання бетону, визначалися диференціальні параметри будови його пористого простору – величина середнього розміру пор $\bar{\lambda}$ та однорідність розмірів капілярів α . Оскільки для всіх 27 складів границя коливань α знаходиться в межах $0 < \alpha \leq 0.241$, а в 13 складах даний параметр взагалі дорівнює нулю, це дозволило зробити висновок: цементно-піщаний пластифікований бетон характеризується великою неоднорідністю пор за розмірами, так як для монокапілярного матеріалу $\alpha = 1$; швидкість насичення зразків водою в початковий період часу (до 6 год включно) значно більша, ніж в наступний за

ним період; оцінити показник $\bar{\lambda}$ для 27-ми складів за даною методикою не представляється можливим.

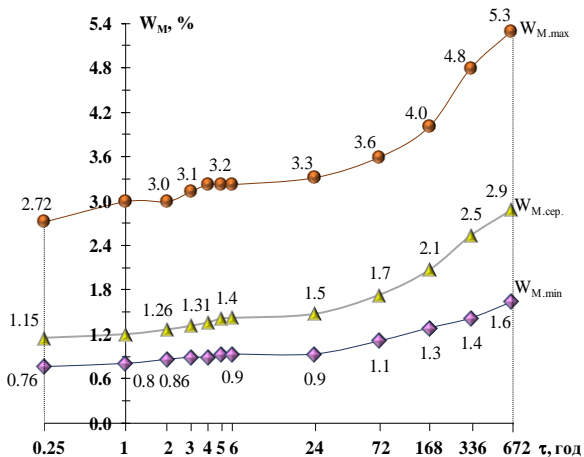


Рис. 1. Кінетика водопоглинання (W_M , %) композитів різного складу

На рис. 2, на прикладі 4-х різних за складом композитів, зображено криві швидкості зростання водопоглинання в перші 6 год при максимальному часі $\tau_{max} = 24$ год або $W_\tau/W_{max} = 1$. Отримані результати демонструють, що зменшення однорідності пор α дійсно веде до росту швидкості збільшення функції W_τ (склади #3, #10, #21) в початковий період часу в порівнянні з функцією W_τ , для якої $\alpha_{max} = 0.241$.

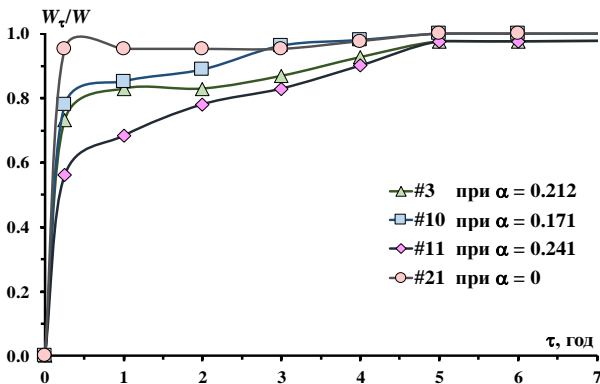


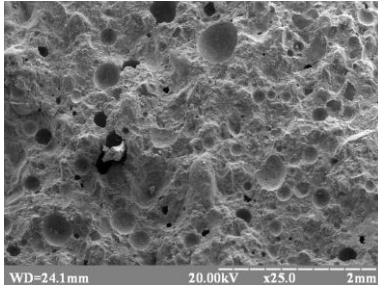
Рис. 2. Швидкість насичення дрібнозернистого бетону водою для складів #3 ($x_1=x_2=x_4=x_5=+1, x_3=-1$), #10 ($x_1=x_4=x_5=-1, x_2=x_3=+1$), #11 ($x_1=x_3=x_5=-1, x_7=x_4=+1$), #21 ($x_1=x_7=x_4=x_5=0, x_3=+1$)

Аналізуючи вплив факторів модифікації (x_1 , x_2 і x_3) цементно-піщаної системи (Рис. 2) на параметр однорідності розмірів пор можна відмітити, що максимальний вміст цеоліту і зерен дрібного піску в суміші з крупним дещо підвищують величину α . Але, найбільш суттєвий вплив на однорідність пор надає суперпластифікатор, високі дозування якого призводять до значної неоднорідності капілярів за розмірами. Окрім диференціальних параметрів визначалося рівноважне поглинання (W_p , %) зразків бетону. Дослідження інтегральної характеристики обумовлено тим, що вона дозволяє через співвідношення величин W_p/W_M оцінити коефіцієнт мікропористості K_M , чисельне значення якого характеризує відносну кількість мікропор в пористій структурі матеріалу. Розрахункові дані K_M для 27 складів знаходяться в межах $0.39 \leq K_M \leq 0.69$, а отже пористість піщаних композитів більш ніж на 39 % представлена мікропорами, радіус яких менше $r < 0.1$ мкм. Як відомо, серед основних факторів визначаючих пористу структуру цементного каменю є мінералогічний склад і дисперсність цементного в'язучого. Оскільки, в роботі використовувався високодисперсний цемент з підвищеним вмістом в клінкері C_3A – це ймовірно зумовило отриманню пористої структури із зменшеними об'ємом макропор і розмірами максимальних діаметрів пор [1, 15]. Окрім цього, як зазначено в роботі [16], додавання цирконового волокна в цементний композит також може призводити до зменшення числа та розміру крупних пор і викликати утворення мікропор. Також в статті [17] зауважено, що заміщення цементу (марки СЕМ І 42.5 R при витраті 300 і 400 кг/м³) 10-15 % природнім цеолітом дозволяє зменшити діаметр пор бетону.

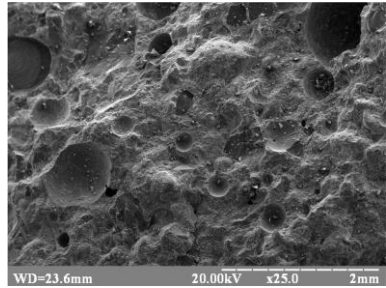
Об'єктивність вищезазначених представлень про будову пористого простору цементних композитів підтверджується оптичними дослідженнями (рис. 3). Так для композиту складу #3, з низьким рівнем пластифікації ($MF=0.3$ %) та високим вмістом інших складових, характерна наявність в матриці дрібних і крупних макропор розміром не більше 500 мкм з переривчастою структурою. У високопластифікованих ($MF = 0.7$ %) складів #5, #6 і #14 розчину на крупнозернистому піску ($SG = 30$ %) спостерігається значно менша кількість макропор і найбільша неоднорідність пор за розмірами та зокрема при такій будові пористого простору цих складів бетону механічні характеристики зразків у водонасиченому стані є суттєво вищими ($f_{ctfm,w} \geq 30\%$, $f_{cm,w} > 50\%$) від – складу #3 [11].

Паралельно проводилися дослідження водопоглинання при капілярному підсосі $W_{кп}$, згідно з методикою EN 1015-18:2002. Під час визначення $W_{кп}$ в певні терміни протягом 28 діб виконувалось спостереження за висотою підняття води по переміщенню видимої межі змочування поверхні зразка і за наявністю чи відсутністю процесу висолоутворення. В свою чергу, як зазначено в [18], висолоутворення на поверхні бетонів при використанні білих цементів не появляються або майже їх не видно, оскільки вони містять

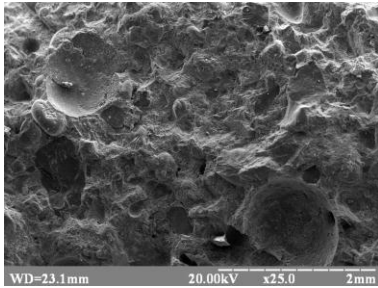
дуже мало розчинних луг. В проведених наших дослідженнях $W_{\text{кп}}$ на поверхні декоративних виробів висолоутворень помічено не було.



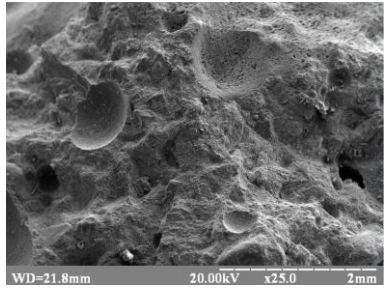
#3 ($x_1=x_2=x_4=x_5=+1, x_3=-1$)
 $\alpha = 0.212; K_M = 0.40$



#5 ($x_1=x_3=x_4=x_5=+1, x_2=-1$)
 $\alpha = 0; K_M = 0.55$



#14 ($x_1=x_2=x_4=-1, x_3=x_5=+1$)
 $\alpha = 0.09; K_M = 0.52$



#6 ($x_1=x_3=+1, x_2=x_4=x_5=-1$)
 $\alpha = 0; K_M = 0.55$

Рис. 3. Макроструктура цементних композитів для складів #3, #5, #6 і #14

На рис. 4 для наочності представлені, на прикладі 4-х різних складів бетону з різним В/Ц, криві кінетики водопоглинання при капілярному підсосі $W_{\text{кп}}$. Найбільше значення $W_{\text{кп}}$ відмічається на низько пластифікованому складі #22 з високим В/Ц на всій ділянці проведення дослідження. При цьому максимальна висота підняття води по капілярам композиту склала близько 6.3см і є практично рівною на вертикальних гранях зразка.

Обробка експериментальних даних дозволила отримати лінійні залежності водопоглинання (W) зразків бетону, за об'ємом W_0 і при капілярному підсосі $W_{\text{кп}}$ в різні терміни їх насичення, від В/Ц та щільності. Виявлено достатньо високу кореляцію r між цими характеристиками матеріалу. Найбільш тісний кореляційний зв'язок демонструють дані 27-ми складів після 28-ої доби перебування зразків у воді. Це обумовлено тим, що при тривалому зберіганні цементних композитів у водних умовах відбувається більш повне їхнє насичення, оскільки починають заповнюватися рідиною більш дрібні замкнуті макропори.

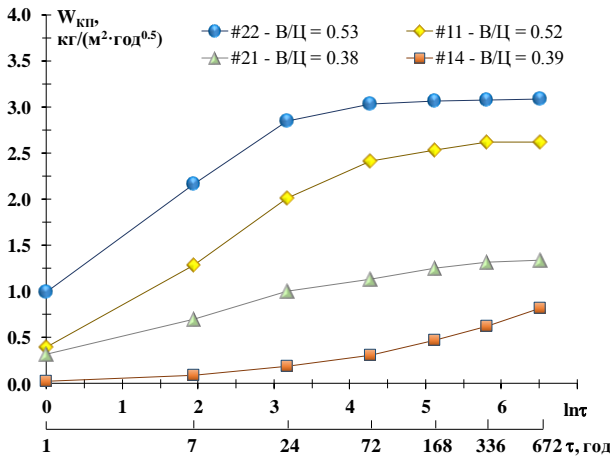


Рис. 4. Капілярне водопоглинання декоративних композитів для складів #22 ($x_1=x_2=x_4=x_5=0, x_3=-1$), #21 ($x_1=x_2=x_4=x_5=0, x_3=+1$), #11 ($x_1=x_3=x_5=-1, x_2=x_4=+1$) і #14 ($x_1=x_2=x_4=-1, x_3=x_5=+1$)

На рис. 5 для 27-ми композитів показана залежність W від B/C і ρ_b в $\tau = 24$ год (час, коли зразки бетону у водонасиченому стані досліджувалися на механічні характеристики).

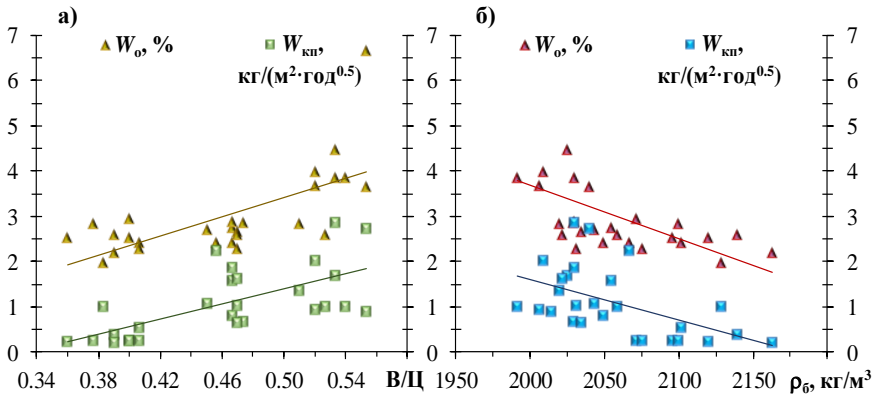


Рис. 5. Залежність водопоглинання від водо-цементного співвідношення (а) і щільності (б) декоративних розчинів

У зв'язку з тим, що інтегральні параметри (W_M і $W_{кп}$) пористої структури матеріалу суттєво залежать від якісного і кількісного складу композиту подальший аналіз проводився з використанням ЕС-моделей.

За натурними даними, отриманих після експонування зразків протягом 24 год у водному середовищі, для W_M і $\ln W_{кп}$ в системі COMPEX побудовано

нелінійні квадратичні ЕС-моделі з 17 і 13 відмінними від нуля коефіцієнтами, при помилках експерименту відповідно $s_e\{W_M\} = 0.11\%$ і $s_e\{\ln W_{\text{кп}}\} = 0.16$ (двосторонній ризик 0.2). ЕС-моделі (1) і (2) структуровано [11], коефіцієнт b_0 дорівнює значенням властивостей в центрі експерименту (при нормалізованих рівнях всіх факторів $x_i = 0$), блок (а) оцінює вплив факторів цементно-піщаної матриці на характеристики, при середніх дозуваннях волокон, блок (б) оцінює вплив гібридного волокна при середніх значеннях факторів модифікації матриці, а блок (с) характеризує синергетичну дію факторів з двох підсистем цементного композиту. Зокрема, ЕС-моделі описують «повні» поля водопоглинання впливу факторів складу на W_M і $\ln W_{\text{кп}}$.

Для аналізу отриманих ЕС-моделей побудовані 3-х факторні діаграми (в осях факторів x_1 - x_3), що розташовані у вершинах несучого квадрата, координатами якого є рівні волокнистих наповнювачів x_4 - x_5 (рис. 6а і 6б).

$$W_M = 1.252 \begin{array}{l} +0.151x_1 \pm 0 x_1^2 - 0.129x_1x_2 \\ +0.040x_2 \pm 0 x_2^2 - 0.165x_1x_3 \\ - 0.390x_3 + 0.189x_3^2 \pm 0 x_2x_3 \text{ (a)} \end{array} \begin{array}{l} +0.046x_1x_4 - 0.076x_1x_5 \\ - 0.113x_2x_4 + 0.110x_2x_5 \\ - 0.066x_3x_4 + 0.144x_3x_5 \text{ (c)} \end{array} \\ \begin{array}{l} +0.086x_4 + 0.139x_4^2 - 0.138x_4x_5 \\ - 0.111x_5 \pm 0 x_5^2 \text{ (b)} \end{array} \quad (1)$$

$$\ln W_{\text{кп}} = 0.380 \begin{array}{l} \pm 0 x_1 - 0.460x_1^2 - 0.079x_1x_2 \\ - 0.051x_2 + 0.245x_2^2 \pm 0 x_1x_3 \\ - 0.757x_3 + 0.150x_3^2 - 0.074x_2x_3 \text{ (a)} \end{array} \begin{array}{l} - 0.143x_1x_4 + 0.185x_1x_5 \\ \pm 0 x_2x_4 - 0.120x_2x_5 \\ + 0.173x_3x_4 \pm 0 x_3x_5 \text{ (c)} \end{array} \\ \begin{array}{l} \pm 0 x_4 - 0.810x_4^2 \pm 0 x_4x_5 \\ \pm 0 x_5 \pm 0 x_5^2 \text{ (b)} \end{array} \quad (2)$$

Аналіз діаграм показує, що на водопоглинання цементно-піщаної матриці, зокрема при безпосередній близькості від волокон, найбільший вплив надає рівень пластифікації композицій. Оскільки, як видно з розташування ізоліній на несучих квадратах, зони мінімальних значень параметрів W_{min} отримуємо:

- для водопоглинання при гідростатичному тиску $W_{M,\text{min}}$ (рис. 6а) з середнім і вище середнього дозуванням суперпластифікатору ($MF \geq 0.5$ %) в координатах параметрів дисперсного армування $F12 = 0.03\%$ та $F6 = 0.014\%$;
- для водопоглинання при капілярному підосі $W_{\text{кп},\text{min}}$ (рис. 6б) на високопластифікованих складах композиту ($MF = 0.7\%$), зокрема, з максимальним рівнем армування матриці тільки волокнами довжиною 12 мм.

В свою чергу, зменшення рівня пластифікації сумішей до мінімального ($MF = 0.3\%$) призводить до значного зростання водопоглинання зразків розчину. Особливо це спостерігається на $W_{\text{кп}}$, де розрахований відносний приріст $\delta\{W_{\text{кп},\text{max}}/W_{\text{кп},\text{min}}\}$ коливається в межах від 7.4 до 22.7 раз. Також,

необхідно відмітити наступне – максимальна степінь гібридного армування матриці веде до зниження показника δ (куб верхній справа). Отже, тонкі високодисперсні волокна при раціональній гранулометрії піску, щільно заанкерувавшись між зернами заповнювача, служать бар'єром на шляху підняття води по капілярам за висотою зразка композиту.

Вплив фракційного складу піску і цеолітового наповнювача на W_M і $W_{кп}$ зразків бетону досить різний. Так, «позитивний» вплив пуцолану на капілярне водопоглинання спостерігається виключно на високопластифікованих складах, зокрема армованих тільки фіброю довжиною 6 мм при вмісті зерен дрібного піску в суміші пісків 53 % (рис. 6б). Проте, при гібридному армуванні цементно-піщаного розчину середніми дозуваннями волокон ($F_6 = F_{12} = 0.015$ %) і максимальній заміні цементу цеолітом $W_{кп}$ підвищується з 0.19 до 0.50 $\text{кг/м}^2 \cdot \text{год}^{0.5}$. У всіх інших випадках помічається негативна дія цеолітового наповнювача, різні дозування якого при розбіжній гранулометрії піску сприяють збільшенню водопоглинання композитів. Це дозволяє припустити, що причиною підвищення W є фізико-хімічна і фізико-механічна зміни в зоні контакту заповнювача і матриці матеріалу. Оскільки заміна в'язучого цеолітом і збільшення в суміші пісків зерен дрібної фракції при забезпеченні вимоги по легкоукладальності композицій постійно сприяли зростанню початкового водо-цементного співвідношення.

Висновки. Водопоглинання значною мірою залежить від структурного оформлення декоративного композиту, що визначається якісним і кількісним вмістом цементу, органо-мінеральних добавок та співвідношенням кварцових зерен дрібного й крупного піску. Аналіз побудованих діаграм за моделями W продемонстрували, бетони, що забезпечують мінімальні рівні водопоглинання за масою і при капілярному підсосі відрізняються за складом. Планується провести багатокритеріальний пошук компромісу між кращими рівнями певних критеріїв оптимальності, за умов виконання вимог до інших критеріїв.

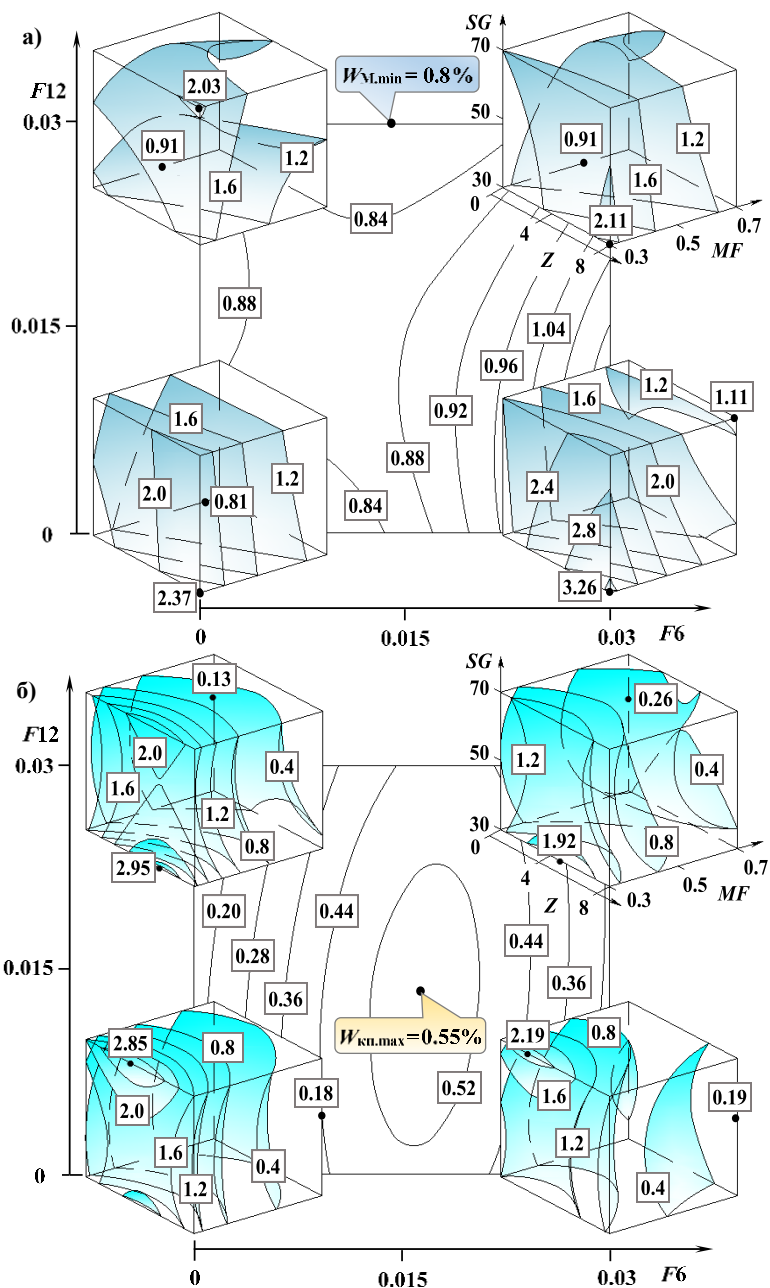


Рис. 6. Вплив факторів модифікації матриці та параметрів дисперсного армування на водопоглинання бетону: а) за масою W_M , %, б) при капілярному підсісі $W_{кл}$, $кг/м^2 \cdot год^{0.5}$

1. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов. М.: Стройиздат, 1979. 344с.
2. Выровой В.Н., Дорофеев В.С., Суханов В.Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структура, самоорганизация, свойства: монография. Одесса: Изд-во «ТЭС», 2010. 169с.
3. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Дворкін Л.Й. та ін.; за ред. Л.Й. Дворкіна, С.М. Бабица. Рівне: НУВГП, 2017. 331с.
4. Баженов Ю.М. Современная технология бетона. *Збірник «Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка»*, 2010. Вип. 36. С. 10-17.
5. Вербецкий Г.П. Прочность и долговечность бетона в водной среде. М.: Стройиздат, 1976. 128с.
6. Харитонов А.М. Управление свойствами конгломератных материалов на основе метода структурного моделирования. *Строительные материалы*, 2011. №3. С. 93-95.
7. Соболев Х.С., Петровська Н.І., Терлига В.С., Ковальчук М.Б. Переваги застосування цеолітових туфів Сокиринського родовища у виробництві сучасних тампонажних матеріалів. *Вісник ПДАБА*. Вип. 10, 2014. С. 4-9.
8. Баженов Ю.М., Демьянов В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: Изд-во Ассоциация строительных вузов, 2006. 368с.
9. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. 2-е изд., перераб. и доп. М., 1998. 768с.
10. Довгань А.Д., Довгань П.М., Ляшенко Т.В. Влияние цеолита и стеклянных волокон на кинетику структурообразования цементных композиций. *Вісник НУВГП. Сер. Технічні науки*. Вип. №2 (82). Рівне: НУВГП, 2018. С. 273-287.
11. Lyashenko T.V., Dovgan A.D., Dovgan P.M. Fibre-reinforced decorative composite: the effects of composition on the strength. *Вісник ОДАБА*. Вип. 73. Одеса: ОДАБА, 2018. С. 89-97.
12. Довгань А.Д., Довгань П.М., Ляшенко Т.В., Хлыцов Н.В. Экспериментально-статистическое моделирование при исследовании дисперсно-армированного песчаного бетона. *Моделирование и оптимизация строительных композитов: матеріали Міжнар. сем.* Одеса: ОДАБА, 2018. С. 30-35.
13. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительного-технологических задач на ЭВМ. К.: Высшая школа, 1989. 328 с.
14. Механоактивация в технологии бетонов: монография / Выровой В.Н. и др. Одесса: ОГАСА, 2014. 148с.
15. Чеховский Ю.В. Понижение проницаемости бетона. М.: «Энергия», 1968. 192с.
16. Рамачандран Р., Фельдман Р., Бодуэн Дж. Наука о бетоне: Физико-химическое бетоноведение / пер. с англ. Т.И. Розенберг, Ю.Б. Ратиновой. М.: Стройиздат, 1986. 278с.
17. Memduh Nas, Şirin Kurbetci. Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. *Computers and Concrete*, Vol. 22, No. 5, 2018.
18. Ли Ф.М. Химия цемента и бетона / пер. с англ. Б.С. Левмана. М., 1961. 645с.

1. Sheikin A., Chekhovsky Yu., Brusser M. The structure and properties of cement concrete. М.: Stroyizdat, 1979. p. 344.
2. Vyrovoy V.N., Dorofeev V.S., Suhanov V.G. Compositional building materials and structures. Structure, self-organization, properties: monograph. Odessa, 2010. p. 169.

3. High-strength quick-hardening concrete and fiber-reinforced concretes: monograph / Dvorkin L.J.; edited by Dvorkin L.J., Babich E.M. Rivne, 2017. p. 331.
4. Bazhenov Y.M. Modern technology of concrete. *Collection «Construction materials, products and sanitary equipment»*, 2010. Vol. 36. pp. 10-17.
5. Verbetskiy G.P. Strength and durability of concrete in water environment. M.: Stroyizdat, 1976. p. 128.
6. Kharitonov A. *Stroitel'nye Materialy [Construction Materials]*, 2011. No 3. pp. 93-95
7. Sobol H.S., Petrovskaya N.I., Terliga V.S., Kovalchuk M.B. Advantages of application of the Sokirnitsky field zeolitic tufa in production of modern grouting materials. *Cisdnier State Academy of Civil Engineering and Architecture Messenger*, 2014. Vol. 10. pp. 4-9
8. Bazhenov Y.M., Demyanov V.S., Kalashnikov V.I. The modified high-quality concrete. Moscow, 2006. p. 368.
9. Batrakov V.G. Modified concrete. Theory and practice. The 2nd Edition, revised and expanded. M., 1998. p. 768.
10. Dovgan A.D., Dovgan P.M., Lyashenko T.V. The influence of zeolite and glass fibers on the kinetics of the cement compositions structure formation. *National university of water and environmental engineering Messenger*, 2018. Vol. (82). pp. 273-287.
11. Lyashenko T.V., Dovgan A.D., Dovgan P.M. Fibre-reinforced decorative composite: the effects of composition on the strength. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*, 2018, Vol. 73, pp. 89-97.
12. Dovgan A.D., Dovgan P.M., Lyashenko T.V., Hlitsov N.V. *Modelling and Optimization of Building Composites*. Odessa: Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2018. pp 30-35.
13. Voznesensky V.A., Lyashenko T.V., Ogarkov B.L. Numerical methods of solving building technological problems with computer. Kiev: Vischa Shkola, 1989. p. 328.
14. Mechanoactivation in technology of concrete: monograph / Vyrovoy V.N. et al. Odessa: Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2014. p. 148.
15. Chekhovskiy Yu. Decrease in permeability of concrete. M.: «Energy», 1968. p. 192.
16. Ramachandran V., Feldman R. and Beaudoin J. *Concrete science: Treatise on Current Research* Heyden and Son, Ltd (London – Philadelphia – Rheine), 1986. p. 278.
17. Memduh Nas, Şirin Kurbetci. Mechanical, durability and microstructure properties of concrete containing natural zeolite. *Computers and Concrete*, Vol. 22, No. 5, 2018.
18. Lea F.M. The Chemistry of Cement and Concrete. M., 1961. p. 645.

**ВПЛИВ РІЗНИХ ВИДІВ МІНЕРАЛЬНИХ ДОБАВОК НА
ВЛАСТИВОСТІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВОГО БЕТОНУ**

**INFLUENCE OF DIFFERENT KINDS OF MINERAL ADDITIVES ON
PROPERTIES OF REACTIVE-POWDER CONCRETE**

Житковський В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, **Дворкін Л.Й.,** д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, **Степасюк Ю.О.,** к.т.н., ст. викладач (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Zhitkovsky V.V, candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-1710-6082, **Dvorkin L.J.,** doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, **Stepasyuk Y.O.,** candidate of technical sciences, senior teacher (National University of Water Management Environmental Engineering, Rivne)

У статті розглянуто можливість отримання реакційно-порошкових бетонів з підвищеною міцністю та тріщиностійкістю шляхом часткової чи повної заміни високоактивних мінеральних добавок, таких як мікрокремнезем іншими.

The article considers the possibility of obtaining reactive powder concretes with high strength and fracture resistance by partially or completely replacing highly active mineral additives, such as microsilica by others. The results of the influence of mineral additives of various types are given. We used inert additives (ground quartz sand and aspiration granite dust), additives of low hydraulic activity (fly ash TPP, blast furnace slag) and additives of high activity (microsilica and metakaolin). The influence of these additives on the technological properties of the powder concrete mixture was studied while providing high fluidity at a water-cement ratio of 0.2...0.25. The influence of mineral additives on the strength of concrete during compression and bending at different ages and the kinetics of its growth were determined. It is established that partial or complete replacement of micro silica with other mineral additives allows to obtain concrete with strength values that are in the range 104...160 MPa. The obtained reactive powder concretes is characterized by an increased value of the compressive strength to flexural strength - 4.0...5.0, which allows us to recommend concrete of this type for structures operating under conditions of high dynamic and shock loads. Considering the estimated cost, the use of additives such as fly ash, ground slag and ground sand may be most economically justifiable.

Ключові слова:

Міцність, згин, стиск, мікрокремнезем, метакеолін, зола-виносу, доменний шлак, гранітний пил, мелений кварц

Keywords:

Strength, bending, compression, microsilica, metakaolin, fly ash, blast furnace slag, granite dust, ground quartz

Вступ. Найбільш ефективним різновидом дрібнозернистого бетону, котрий володіє підвищеною однорідністю, міцністю та деформативністю є розроблений у Франції у 90-х роках 20 століття реакційно-порошковий бетон (РПБ) (Reactive Powder Concrete (RPC)) [1]. Для такого бетону типова міцність при стиску знаходиться у межах від 150 до 200 МПа, що в чотири рази перевищує норму для звичайних бетонів [2]. За даними [3, 4, 5] такий бетон при спеціальних умовах може досягнути підвищення міцності до 800...810 МПа. Як показують дані багатьох дослідників [3], для РПБ поряд високою міцністю характерний також високий показник тріщиностійкості, що характеризується співвідношенням міцності при стиску до міцності при згині. Такий показник для РПБ знаходиться у межах від 3,5 до 5 [2], тоді як у високоміцних бетонах – 8...10 [1]. Такі високі показники можуть бути корисні з позиції досягнення підвищеної ударної міцності, необхідної для використання у захисних та сейсмостійких спорудах. Поєднання надвисокої міцності та високої деформативності у реакційно-порошковому бетоні забезпечується додатково внаслідок дисперсного армування короткими сталевими волокнами [3, 6, 7, 8].

Як показують дослідження різних авторів [4-6], характерних для РПБ унікальних властивостей такий бетон набуває за рахунок використання підвищеної кількості високоактивних мінеральних добавок, таких як мікрокремнезем, які хімічно реагують з гідроксидом кальцію і активно зв'язують його у нерозчинні сполуки [9]. Переважна кількість досліджень РПБ [4-8] передбачають обов'язкову необхідність використання у якості активного компонента добавки мікрокремнезему.

Використання високоактивних гідравлічних добавок суттєво ускладнює технологію отримання РПБ та підвищує його вартість, причому у багатьох регіонах (наприклад в Україні) такі добавки відсутні, тому поряд з мікрокремнеземом доцільно розглянути можливість використання високоактивних алюмосилікатних добавок, таких метакеоліни та цеоліти, а також гідравлічних добавок меншої активності, таких як золи-виносу та доменні шлаки.

Мета роботи та план експерименту. Метою роботи було встановлення можливості часткової чи повної заміни мікрокремнезему, як найбільш важкодоступного компоненту порошкових бетонів, більш поширеними мінеральними добавками.

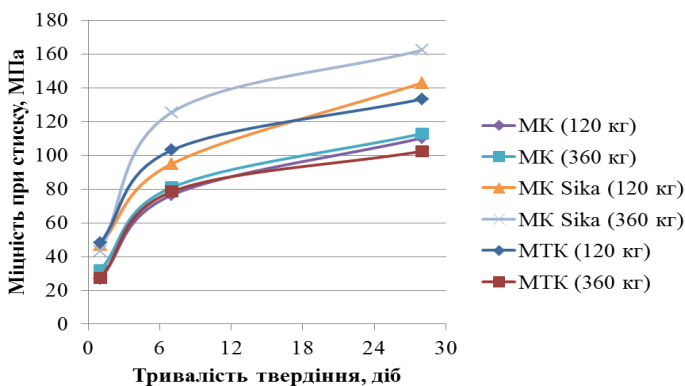
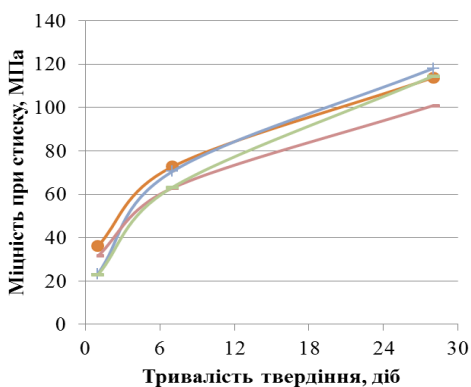
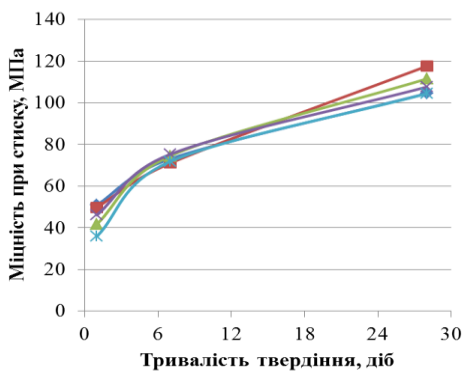


Рис. 1 – Кінетика наростання міцності РПБ при стиску з різними тонкомеленими добавками

В якості мінеральних добавок при проведенні експериментальних

досліджень було використано мелений кварцовий пісок (МКП) з питомою поверхнею $S_n=3786 \text{ см}^2/\text{г}$, гранітний аспіраційний пи́л (АГП) ($S_n=2367 \text{ см}^2/\text{г}$), доменний гранульований шлак (ДГШ) ($S_n=2725 \text{ см}^2/\text{г}$), зола виносу Бурштинської ТЕС (ЗВ) ($S_n=2527 \text{ см}^2/\text{г}$), тонкомелений мелений кремнезем ($S_n=21094 \text{ см}^2/\text{г}$). Для порівняння був також отриманий реакційно-порошковий бетон на мікрокремнеземі SikaFume-HR/TU (МК Sika) ($S_n=23158 \text{ см}^2/\text{г}$). Також порівняння усіх досліджених складів здійснювалось з порошковим бетоном, що не містить жодних мінеральних наповнювачів ні інертних, ні активних.

Під час експерименту визначалась водопотреба бетонної суміші (В/Ц) до досягнення рухомості текучої суміші. Рухомість контролювалась шляхом вимірювання розпливу за віскозиметром Сутгарда (25...30 см). З бетонної суміші виготовлялись зразки-куби $10 \times 10 \times 10 \text{ см}$ та балки $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$. В усіх точках експерименту було використано поліакрилатний суперпластифікатор Marei Dynamon SR3. Визначали міцність при стиску та при згині у віці 1, 7, 28 діб твердіння у нормальних умовах. Результати експерименту наведені у на рис 1 та 2.

Результати експерименту і їх обговорення . Як видно з отриманих результатів, РПБ, виготовлений з високотекучих сумішей при максимальному вмісті мікрокремнезему SikaFume-HR/TU $360 \text{ кг}/\text{м}^3$ на 28-му добу нормального твердіння досягає міцності при стиску $162,4 \text{ МПа}$, що узгоджується з відомими даними [4,8]. Часткова чи повна заміна мікрокремнезему даної марки іншими досліджуваними добавками дає можливість отримати бетон зі значеннями міцності, що знаходяться у діапазоні $104 \dots 160 \text{ МПа}$. Такі значення міцності, при забезпеченні високої текучості, вказують на те, що отриманий матеріал повинен характеризуватися високими технологічністю та експлуатаційними характеристиками в умовах дії різних навантажень.

Міцність при згині для усіх досліджених серіях зразків знаходилась у межах від $18,3$ до $32,2 \text{ МПа}$ (рис. 2). Такі досить високі значення міцності є визначальними щодо визначення можливості застосування матеріалів у конструкціях до яких ставляться високі вимоги до динамічних та ударних навантажень. Звертають на себе увагу досить високі значення співвідношення міцності РПБ при стиску до міцності при згині ($f_{cm}/f_{c,tf}$) – $4,0 \dots 5,0$. Як відомо [10], даний показник характеризує стійкість бетону до утворення тріщин і його деформативність. Для звичайних бетонів співвідношення $f_{cm}/f_{c,tf}$ зазвичай знаходиться у межах $7 \dots 8$, для дрібнозернистих – дещо нижче $5 \dots 6$. Таким чином, підвищена тріщиностійкість і тому деформативність РПБ є визначальною властивістю, котра дозволяє рекомендувати бетони такого конструкцій, що працюють в умовах підвищених динамічних і ударних навантажень, характерних для захисних та фортифікаційних споруд.

Усі досліджені види мінеральних добавок впливають на міцність РПБ.

Бетон, що містив лише інертні тонкомелені добавки (мелений пісок та аспіраційний гранітний пил) характеризувався максимальною міцністю при стиску 117 МПа. Така міцність була досягнута при використанні меленого піску у кількості 120 кг/м³. У даному бетонна суміш мала максимальну текучість за досить низького В/Ц (В/Ц=0,22) та максимальну щільність утаювки, що підтверджується даними наведеними у [4-8].

Так як і для інших видів бетонів на міцність РПБ суттєво впливає показник В/Ц. Збільшення кількості меленого піску до 360 кг/м³ підвищує водопотребу до 0,29 (В/Ц) і відповідно знижує міцність до 111,5 МПа.

Добавка аспіраційного гранітного пилу у більшій мірі знижує рухомість бетонної суміші ніж мелений пісок, ймовірно через присутність у його складі деякої кількості глини. Міцність при стиску у даному випадку знижується до 104...107 МПа.

Порівняно з дисперсними інертними добавками зола-виносу та мелений гранульований шлак відрізняються значно більшим впливом на міцність, що помітно проявляється у пізні терміни твердіння. Так на 28 добу максимальна міцність при стиску становила 118 МПа – для шлаку і 114,5 МПа – для золи-виносу. На відміну від інертних добавок, де збільшення їх вмісту викликало лише погіршення текучості та зниження міцності, у випадку золи і шлаку максимальна міцність як раз досягалась при збільшенні вмісту добавок до 360 кг/м³, причому у більш пізньому віці. Як відомо [11], у цементному камені РПБ внаслідок високих витрат цементу виділяється значна кількість гідрооксиду кальцію, з яким мінеральні добавки такі як зола чи шлак активно взаємодіють утворюючи нерозчинні сполуки. У свою чергу зола-виносу, внаслідок своєрідної форми зерен [12] проявляє деяку пластифікуючу дію, що дозволяє зберегти низькі значення В/Ц та щільну структуру цементного каменю навіть при високих витратах. Шлак, у тих же умовах, викликає зниження рухомості суміші, хоча по міцності цього помітно не було.

Як і очікувалось з огляду на основні праці у яких досліджувався РПБ [4-8], максимальне підвищення міцності було досягнуто за рахунок використання високоактивних добавок мікрокремнезему та метакаоліну. У найбільшій мірі проявив себе мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (максимальна міцність при стиску, при максимальній його витраті 360 кг/м³ – 162,4 МПа), дещо меншу ефективність з позиції досягнення максимальної міцності показала добавка метакаоліну (133,4 МПа).

Слід відмітити, що максимальна ефективність добавки метакаоліну спостерігається при витраті близько 10% від маси цементу, такий результат підтверджує дані отримані нами раніше, при дослідженні високоміцних бетонів [10]. Подальше підвищення кількості метакаоліну призводить до збільшення водопотреби бетонної суміші, внаслідок збільшення її в'язкості і міцність бетону далі знижується (рис.1).

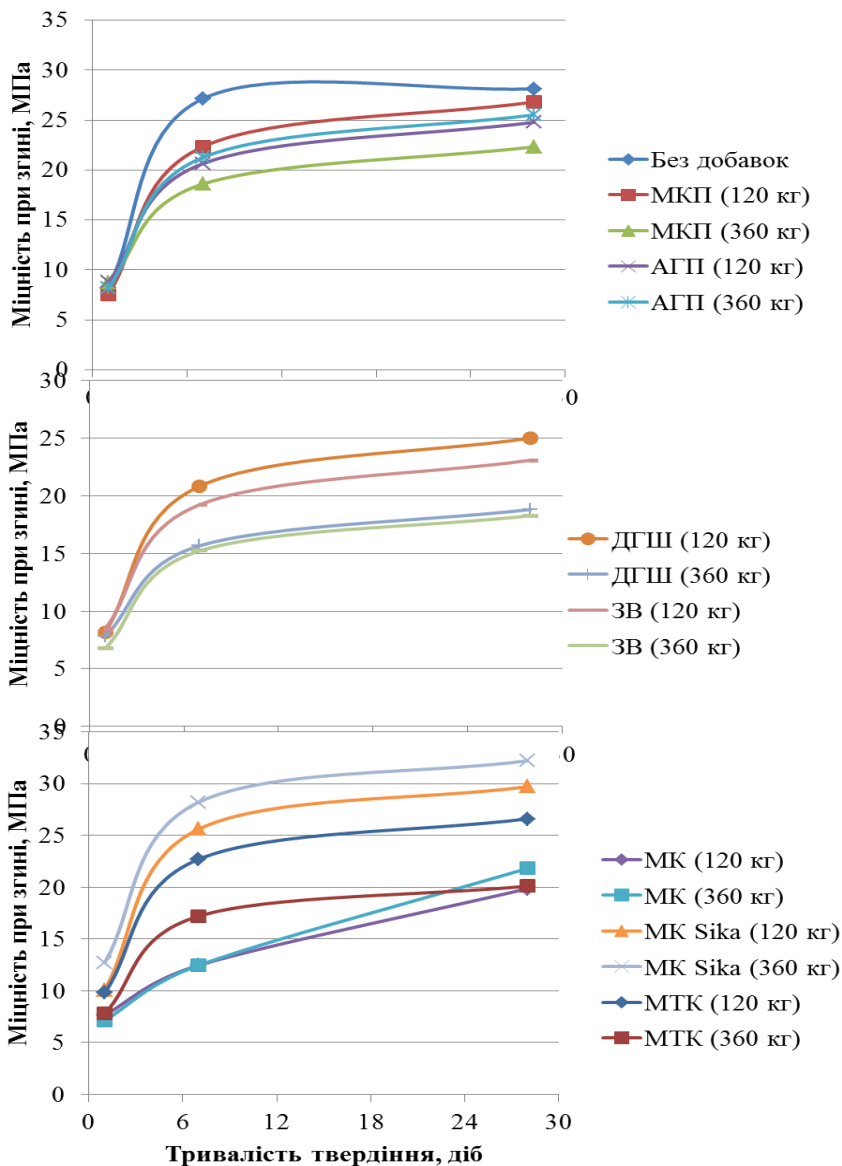


Рис. 2 – Кінетика набору міцності РПБ з різними видами активних мінеральних добавок при згині

Кінетика набору міцності РПБ (рис.1) в основному відповідає відомим даним для такого типу бетонів [8]. Максимальною швидкістю твердіння відрізнялись серії, що містили мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (витрата 360 кг/м^3) та метакаолін (витрата 120 кг/м^3). Найбільш повільно тверділи композиції, із золою-виносу та шлаком. Скоріше за все для даних композицій ефективним буде застосування теплової обробки.

Так як досліджувані нами бетони можуть бути використані для швидкісного зведення споруд, особливої уваги заслуговує вплив складу композитів на міцність у віці 1 доба. Слід відмітити, що усі серії, що характеризувались максимальною міцністю, крім тих, що містили золу-виносу та шлак, на першу добу досягли міцності в межах від 40 до 48 МПа. Таку міцність, враховуючи висновки за роботою [13], можна вважати достатньою для швидкісного зведення споруд.

Характер впливу різних видів мінеральних добавок на міцність РПБ при згині майже такий як на міцність при стиску. Максимальну $f_{c,tf}$ мають композити, що містять мікрокремнезем SikaFume-HR/TU (29...32 МПа), дещо нижчу – з метакаоліном та меленим піском (26...27 МПа). Бетони, що містили шлак та золу характеризувались подібними значеннями міцності при згині – 23...25 МПа.

Висновки.

Встановлено, що часткова чи повна заміна мікрокремнезему іншими мінеральними добавками дає можливість отримати бетон зі значеннями міцності, що знаходяться у діапазоні 104...160 МПа.

Для РПБ з використанням метакаоліну в кількості 120 кг/м^3 , характерні значення міцності при стиску у межах 130...133 МПа.

Для отриманих РПБ характерне підвищене значення співвідношення міцності при стиску до міцності при згині ($f_{cm}/f_{c,tf}$) – 4,0...5,0. Даний показник характеризує підвищену тріщиностійкість і деформативність матеріалу, тому є визначальною властивістю, котра дозволяє рекомендувати бетони такого типу для конструкцій, що працюють в умовах підвищених динамічних і ударних навантажень.

Враховуючи орієнтовну вартість, використання таких добавок як зола-виносу, меленого шлаку та меленого піску може бути найбільш виправдане з економічної точки зору.

1. Kwan, A.H.K. (2003), "Development of High Performance Concrete for Hong Kong", Materials Science and Technology in Engineering Conference - Now, New and Next, website available at http://www.hkpc.org/hkiemat/mastec03_notes/03.pdf

2. Aarsleff, L., Bredal-Joregensen, J. and Poulsen, E. (1985), "On the properties of ultra high strength concrete with particular reference to heat of hydration", Very High Strength Cement-Based Materials, Materials Research Society Symposia Proceedings, Vol. 42, pp. 19-29.

3. Baache, H. H. (1981), "Superplasticizers in Concrete", Proceedings of the 2nd International Symposium in Denmark.

4. Richard, P. and Cheyrezy, M. (1995), "Composition of reactive powder concretes", Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, pp. 1501-1511.

5. Cyr, M.F. and Shah, S.P. (2002), "Advances in concrete technology", Advances in Building Technology, Vol. 1, pp. 17-27.

6. Shannag, M.J. (2000), "High strength concrete containing natural pozzolan and silica fume", Cement & Concrete Composites, Vol. 22, pp. 399-406.

7. Wong, K.Y. (1996), "Development of high strength concrete for Hong Kong and investigation of their mechanical properties", M. Phil. Thesis of the University of Hong Kong.

8. Colleparidi, M., Colleparidi, S., Troli, R. and Coppola, L. (2003), "Innovative Concretes (SCC, HPC and RPC) in the Field of Architectural, Civil and Environmental Engineering", Proceedings of the Sixth CANMET / ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology Proceedings.

9. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. СПб.: Стройбетон, 2006, 691 с.

10. Дворкін Л.Й., Лушнікова Н.В., Рунова Р.Ф., Троян В.В. Метакеолин в будівельних розчинах і бетонах: Монографія. - Київ: Вид-во КНУБіА, 2007.-214 с.

11. Ng Ka Man. Studying the Production Process and Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Made Using Local Available Materials. Hong Kong. 2009, pp. 263.

12. Дворкин Л. И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой; Под ред. Дворкина Л. И. – Киев: Будивэлник, 1991. – 136 с.

13. Дворкін Л.Й. Високоміцні швидкотверднучі бетони та фібробетони: монографія. Дворкін Л.Й., Бабич Є.М., Житковський В.В., Бордюженко О.М., Кочкар'ов Д.В., Філіпчук С.В., Ковалик І.В., Ковальчук Т.В., Скрипник М.М. – Рівне : НУВГП, 2017. – 331 с.

9. Dvorkyn L.Y., Dvorkyn O.L. Osnovy betonovedeniya. SPb.: Stroybeton, 2006, 691 s.

10. Dvorkin L.Y., Lushnikova N.V., Runova R.F., Troyan V.V. Metakaolin v budivel'nykh rozchynakh i betonakh: Monohrafiya. - Kyiv: Vyd-vo KNUBiA, 2007.-214 s.

11. Ng Ka Man. Studying the Production Process and Mechanical Properties of Reactive Powder Concrete Made Using Local Available Materials. Hong Kong. 2009, rr. 263.

12. Dvorkyn L. Y. Tsementnye betony s myneral'nymy napolnytelyamy / L.Y. Dvorkyn, V.Y. Solomатов, V.N. Vyrovoy; Pod red. Dvorkyna L. Y. – Kyev: Budyvel'nyk, 1991. – 136 s.

13. Dvorkin L.Y. Vysokomitsni shvydkotverdnuchi betony ta fibrobetony: monohrafiya. Dvorkin L.Y., Babych YE.M., Zhytkovs'kyy V.V., Bordyuzhenko O.M., Kochkar'ov D.V., Filipchuk S.V., Kovalyk I.V., Koval'chuk T.V., Skrypnyk M.M. – Rivne : NUVHP, 2017. – 331 s.

УДК 691.5

ВПЛИВ ВИДУ В'ЯЖУЧОЇ РЕЧОВИНИ НА ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ БЕТОНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ АКТИВНОГО ЗАПОВНЮВАЧА

THE INFLUENCE OF THE TYPE OF BINDER ON THE PROCESSES OF STRUCTURE FORMATION OF CONCRETES USING ACTIVE AGGREGATE

Іваничко В.В., аспірант, ORCID 0000-0002-4384-6490, **Ковальчук О. Ю.** к.т.н., с.н.с., ORCID 000-00001-6337-0488

Ivanychko V., postgraduate, ORCID 0000-0002-4384-6490, **Kovalchuk O.**, PhD, Senior Researcher, ORCID 000-00001-6337-0488

Проведено дослідження властивостей бетонів із використанням реакційно-здатного заповнювача на основі різних в'язучих речовин. Проаналізовано процеси протікання реакції в контактній зоні «цементний камінь – реакційний заповнювач», а також вплив добавок на деформації розширення. Запропоновано механізм переведення лужної корозії штучного каменю із деструктивного напрямку у конструктивний.

The paper reported about investigation of service and specific properties of mortars and common concretes using reactive aggregates on the bases of different types of binders and cementation materials (OPC, OPC with extra alkalis, alkaline Portland cement, slag alkali activated cement). The influence of the nature active aggregate type (olivine, basalt, opal, andesite, perlite comparing to quartz) on alkaline corrosion processes gain was shown. The processes of reaction gain in the interfacial transition zone “artificial cement stone – reactive aggregate” were studied using different cementitious systems. Also it was studies the influence of mineral admixtures on expansion/shrinkage deformations. The differences in structure formation processes in alkali activated cement systems using different types of alkaline component (solution versus dry alkaline salts) using traditional (quartz) and active (basalt) aggregates was shown. The mechanism of such differences was explained.

The regularities of alkaline corrosion of the active aggregates were investigated using different types of cementitious materials. The new mechanism of reaction “alkalis – active aggregate” was proposed, so far as it

was shown possibility to regulate the process gain for changing corrosion processes from the destructive into constructive.

Ключові слова: кислота, заповнювач, луг, цемент, реакція, структуроутворення.

Acid, aggregate, alkalis, cement, reaction, structure.

Вступ. До теперішнього часу випадки внутрішньої корозії бетону зустрічались достатньо не часто. Проте внаслідок погіршення якості заповнювачів, зміни технології виготовлення цементу та підвищення об'єму хімізації бетону і погіршення умов експлуатації бетонних та залізобетонних конструкцій проблема передчасного руйнування бетонних споруд вийшла на перший план. Однією з основних причин зниження довговічності бетону є лужна корозія цементного каменю бетону, обумовлена реакцією «луг-реакційно здатний заповнювач». Інтенсивність цієї реакції обумовлена видом і кількістю лугів, видом і вмістом по відношенню до лугів аморфного кремнезему, умовами протікання реакції.

На сьогодні не існує ефективних методик відновлення бетонних та залізобетонних конструкцій, що зазнали лужної корозії. Традиційно, такі конструкції виводять із експлуатації та замінюють на нові, що призводить до надмірних витрат коштів та ускладнює експлуатацію будівель і споруд, особливо у сфері дорожнього будівництва. Тому питання протидії лужній корозії є питанням стабільного розвитку будівельної галузі і держави в цілому.

Аналіз останніх досліджень. Вперше про реакційну здатність лугів у 1916 р., де було повідомлено про реакцію між польовим шпатом та карбонатом натрію, що призвело до формування гелю. Деградацію бетону внаслідок цієї реакції між лугами, що містились у цементі, та деякими природними заповнювачами вперше було зафіксовано у США. У 1922 р. подібний випадок трапився у New River Hydropower Station (Virginia, USA) після лише десяти років після зведення. У 1940 р. опубліковано результати досліджень [1], де було зафіксовано “лужну реакцію” (реакцію луг – заповнювач, AAR) внаслідок використання опаломістких фракцій заповнювача для зведення дамби у Каліфорнії. Ці випадки ініціювали велику кількість досліджень, що проводились у США, з метою виявлення причин та вживання відповідних заходів.

Реакцію між лугами та силікатною кислотою (лужно – кремнеземиста реакція, ASR) описали у 1947 [2], а за декілька років, у 1952, ця реакція була описана у США [3].

Результати експериментальних досліджень, які було проведено різними виконавцями [4] дозволяють зформулювати основи механізму протікання

реакції ААР:

- цемент як такий, добавки у бетон та зовнішнє агресивне середовище є джерелами лугів;
- припустимий вміст лугів у портландцементі (перерахований на Na_2O –еквівалент ($\text{Na}_2\text{O}+0.658\text{K}_2\text{O}$) обмежується величиною $\leq 0.6\%$ [5];
- у випадку застосування змішаних цементів цей показник може сягати 2% ;
- процес розширення супроводжується осмотичним тиском, який створюється в'язко-текучим (пластичним) гелем силікатів лужних металів, що утворюються внаслідок процесу реакції [6-8].
- присутність вільного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ у цементному камені відіграє важливу роль у описаних процесах, який спочатку підвищує проникність мембрани [9], а потім впливає на утворення додаткової кількості лугів внаслідок обмінних реакцій $\text{Ca}(\text{OH})_2$ та солями лужних металів.

Тож, аналіз літературних джерел підтвердив проблему лужної корозії заповнювача у бетоні і можна сказати, що проблеми співпраці активного заповнювача та лужних цементів потребують більш детального дослідження. Існуюча теорія щодо механізму корозії не допускає використання альтернативних цементів. Це дозволить уникати процесів лужної корозії заповнювача у реальних конструкціях, оскільки реакція буде спрямована не на руйнування цементного каменю, а на його ущільнення та зміцнення.

Мета і задачі досліджень. Основною метою роботи є визначення впливу природи в'язучої речовини на процеси формування структури, які відбуваються в контактній зоні взаємодії «цементний камінь - заповнювач».

Матеріали та методи досліджень. Потенційно реакційно-здатні заповнювачі з щільних гірських порід використовували у вигляді дрібного щелебно поліфракційного складу з розміром частинок 0.5-10 мм, хімічний склад яких наведений у табл.1. Для виготовлення контрольних зразків як заповнювач використовували дніпровський річковий кварцовий пісок з $M_k=1.2$.

Таблиця 1

Хімічний склад сировинних матеріалів

Тип гірської породи	Вміст оксидів, % за масою									
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SiO ₂
Олівінова	50,0	15,7	2,26	–	10,5	10,4	9,0	2,4	2,4	50,0
Базальтова	50,4	12,5	2,5	9,4	8,5	9,3	5,7	2,2	0,9	50,4
Андезитова	54,2	18,0	0,4	9,39	8,6	4,7	1,0	2,1		54,2
Перлітова	72,8	12,5	0,11	0,9	3,4	1,07	0,17	2,1	4,5	72,8
Пісок кварцовий	95,9	0,4	0,02	9,2	0,16	0,23	0,33	0,14	0,29	95,9

При дослідженні поведінки лужно-реакційних заповнювачів в лужних бетонах як в'язучі матеріали було використано:

- портландцемент М400 (ПЦ П/А-III) (Na_2O -еквівалент -0,22%);
- портландцемент М400 (ПЦ П/А-III) з підвищеним вмістом Na_2O - 1,3%;
- шлаколужний цемент ЛЦЕМ I з вмістом Na_2O – 2,5%;
- лужний шлакопортландцемент ЛЦЕМ IV (60% шлаку) з вмістом Na_2O - 2,5%;

Ступінь дисперсності в'язучих композицій складала 440...460 м²/кг (за Блейном).

Для зменшення впливу деструктивних процесів в контактній зоні до складу цементів вводили метакаолін в кількості 15%.

Визначення міцності виконували на бетонних балочках розміром 4×4×16 см (цемент: дроблений базальтовий камінь=1:2.25 за масою), а деформативних властивостей на балочках розміром 2.5×2.5×28.5 з мідними реперами – для контролю деформацій. Відношення об'єму силікату натрію до вмісту цементу становило 0.45 та вміст $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ – 4.92 % за масою. Після 2 днів бетонні балочки розпалублювали та поміщали для подальшого тверднення у термостат з параметрами $T=38$ С та відносною вологістю R.H. близько 100 %.

Визначення лінійних деформацій виконували із використанням цифрових індикаторів із точністю вимірювання до 0.01 мм. Базові показники знімали у віці 2 доби після моменту розпалублення. Умови зберігання були аналогічні таким, що використовували для визначення міцності.

Результати досліджень. Вплив активних мінеральних добавок на деформації розширення бетону із лужно-реакційним заповнювачем. На рис.1 зображено вплив добавки мета каоліну на деформації розширення композицій. З рис. 2, а значне розширення спостерігається у складах на основі портландцементу з підвищеним вмістом Na_2O -1.3% а також у лужного портландцементу з підвищеним вмістом Na_2O -2.5% при використанні в якості заповнювача андезитової породи.

Введення добавки виводить усі склади з зони ризику незалежно від виду в'язучої речовини і типу заповнювача (рис.2, б). В цьому випадку контактна зона не має слідів корозії (рис.3, з, рис.4-5, б). Це можна пояснити тим, що в присутності Al_2O_3 і при сильно лужному середовищі в контактній зоні утворюються умови для синтезу лужних цеолітоподібних гідроалюмосилікатів, які представлені загальною формулою $\text{Na}_2\text{O}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot m\text{SiO}_2\cdot n\text{H}_2\text{O}$, тобто проходить інтенсивне зв'язування лугів.

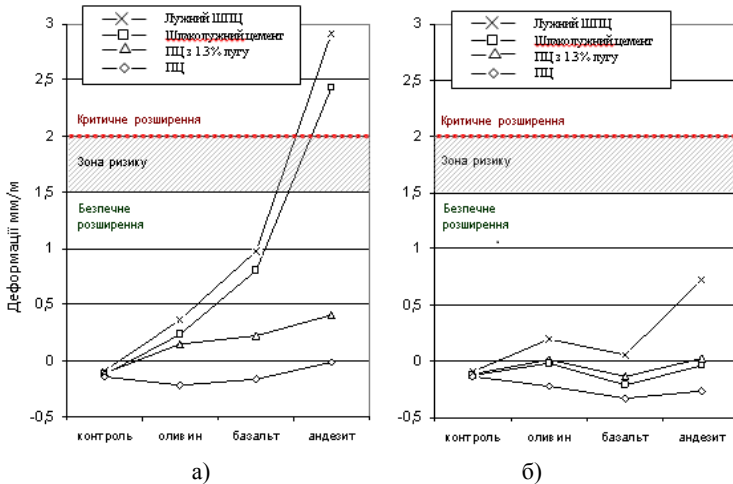


Рис. 1. Вплив виду заповнювача і добавки метакаоїну на деформації зразків бетону. а) без добавки, б) з добавкою 15% метакаоїну

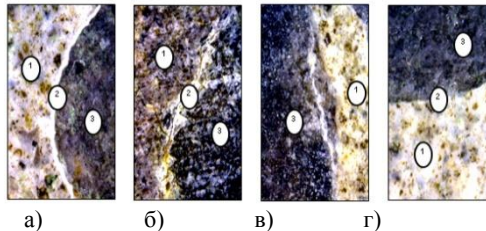


Рис. 2. Стан контактної зони «андезит – цементний камінь» при використанні портландцементу з підвищеним вмістом Na_2O – 1,3%

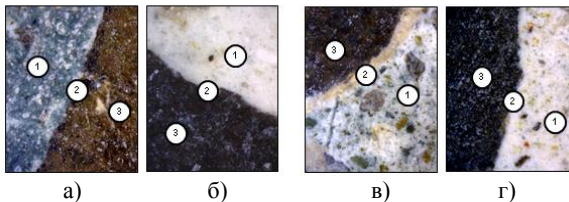


Рис. 3. Стан контактної зони «андезит – цементний камінь» а) при використанні шлаколужного цементу з вмістом Na_2O – 2,5%; (склад без добавок); б) склад з додаванням метакаоїну; в) при використанні лужного шлакопортландцементу з вмістом Na_2O – 2,5% (склад без добавок); г) склад з додаванням метакаоїну.
1 – цементний камінь, 2 – контактна зона, 3 – реакційний заповнювач.

Результати зміни міцнісних характеристик та деформацій зразків представлено у табл. 2.

Аналіз отриманих результатів показує, що при введенні до складу активного Al_2O_3 у складі метакаоліну величина деформацій розширення зразків знижується. Активний Al_2O_3 активно приймає участь у процесах формування структури у контактній зоні «цементний камінь – заповнювач».

Таблиця 2.

Міцність та усадка зразків

№	Склад цементу	Міцність при стиску/згині, МПа, після, діб					Деформації усадки (-)/розширення (+), мм/м, після, діб				
		28	90	180	270	360	28	90	180	270	360
1	Портландцемент + H ₂ O	72.3 7.3	74.3 10.3	74.0 10.0	75.3 8.9	73.0 8.1	-0.4 1	-0.1 8	-0.0 2	+0.0 6	+0.44
2	Портландцемент +H ₂ O+МК	67.0 6.4	64.2 7.1	66.8 7.0	67.7 6.8	67.0 6.9	-0.1 6	-0.1 0	-0.0 6	-0.0 2	+0.10
3	Портландцемент +SS	80.3 7.1	109.7 6.7	133. 3 6.3	132.8 6.2	130 6.5	-0.2 0	+0.0 9	+0.2 1	+0.2 8	+0.30
4	Портландцемент +SS+МК	104. 4 6.3	119.8 7.2	127. 1 7.5	130.7 7.4	131 7.6	-0.1 9	-0.1 0	-0.0 8	-0.0 3	-0.01

Примітка: SS – силікат натрію з Ms=2.87 та $\rho=1300 \text{ кг/м}^3$; МК – добавка метакаоліну – 15 % від маси цементу.

Досліджено також вплив типу активної модифікуючої добавки на розвиток реакції в контактній зоні. Результати наведено у табл 3.

Таблиця 3.

Вплив складу склофази різних цементів на протікання реакції

Наявність добавки	Лужний пуцолановий цемент (клінкер:зола – 40:60)		Лужний шлакопортландцемент (клінкер:шлак – 40:60)	
	Деформації расширения, мм/м, через, сут			
	14	28	14	28
Без добавки	0,31	0,42	2,40	2,52
З добавкой метакаоліну	0,11	0,23	0,70	0,72

Водночас, введення базальтового заповнювача до складу розчинів на основі лужних цементів, що містили лужний компонент у вигляді сухої солі призводить до зниження активності композицій порівняно із системами, в яких використовували звичайний кварцевий пісок.

Отже, можна стверджувати, що вид та вміст лужного компоненту також активно впливає на перебіг процесів лужної корозії заповнювача у бетонах та будівельних розчинах.

Висновки

Проведені дослідження показали можливість використання активного заповнювача при застосуванні цементів як традиційних (портландцементу) так і лужних. Показані, що введення до складу лужних цементів активного глинозему у вигляді мета каоліну дозволяє регулювати структуроутворення у контактній зоні, знижуючи деформації розширення до безпечного рівня. Завдяки цьому забезпечується надійність і довговічність бетонних і залізобетонних конструкцій та виробів.

Показані відмінності у процесах структуроутворення різних бетонів із застосуванням цементів різного типу дозволять проектувати склади бетонних сумішей і матеріалів із наперед заданими властивостями, враховуючи особливості матеріалів, що буде використано.

1. T.E. Stanton, Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate./ J. Amer. Soc. Eng. 1940. Випуск 66, стор. 1781–1811.
2. P. Bredsdorf, G. Idorn, A. Kjaer, N. Plum, E. Poulsen, Chemical reaction involving aggregate. In: Proc. IV Int. Sym.Chem.Cem. II (1960). Стр. 749–783.
3. Kühl, Hans. Zement-Chemie: Die Erhärtung und die Verarbeitung der hydraulischen Bindemittel. Vol. 3. Verlag Technik, 1951.
4. Alkali activated cements mix design for concretes application in high corrosive conditions. 2018: стр. 36./MATEC Web of conferences. 2018. Vol. 230, 03007.
5. Omelchuk V., Ye G., Runova R., Rudenko I. Shrinkage behavior of alkali-activated slag cement pastes./Key Engineering Materials. 2018. Vol. 761 KEM. С. 45–48. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.761.45>.
6. Bondarenko, O., Guzii, S., Zaharchenko, K., Novoselenko, E. Development of protective materials based on glass- and slag-containing portland cement structures / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Вип. № 6/11(78). Стр. 41-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56577.
7. P. Krivenko, R. Drochytka, A. Gelevera, E. Kavalerova. Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement concretes. /J. Cement and Concrete Composites. 2014. Vol. 45. Pp. 157–165.
8. X.Feng, M.D.A. Thomas, T.W Bremner, B.J. Balcom, K.J. Folliard, Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. /J.Cement and Concrete Research. 2005. Вип. 35(9). Стр. 1789–1796.
9. P.Krivenko, O. Petropavlovsky, O. Kovalchuk, A Comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of of alkali-activated slag cement and concrete. J. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 1/6 (91) (2018) 33–39.

1. T.E. Stanton, Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate./ J. Amer. Soc. Eng. 1940. Випуск 66, стор. 1781–1811.

2. P. Bredsdorf, G. Idorn, A. Kjaer, N. Plum, E. Poulsen, Chemical reaction involving aggregate. In: Proc. IV Int. Sym.Chem.Cem. II (1960). Стр. 749–783.
3. Kühl, Hans. Zement-Chemie: Die Erhärtung und die Verarbeitung der hydraulischen Bindemittel. Vol. 3. Verlag Technik, 1951.
4. Alkali activated cements mix design for concretes application in high corrosive conditions. 2018: MATEC Web of conferences. 2018. Vol. 230, 03007.
5. Omelchuk V., Ye G., Runova R., Rudenko I. Shrinkage behavior of alkali-activated slag cement pastes. //Key Engineering Materials. 2018. Vol. 761 KEM. С. 45–48. URL: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.761.45>.
6. Bondarenko, O., Guzii, S., Zaharchenko, K., Novoselenko, E. Development of protective materials based on glass- and slag-containing portland cement structures / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2015. Вип. № 6/11(78). Стр. 41-47. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.56577.
7. P. Krivenko, R. Drochytka, A. Gelevera, E. Kavalerova. Mechanism of preventing the alkali–aggregate reaction in alkali activated cement concretes. /J. Cement and Concrete Composites. 2014. Vol. 45. Pp. 157–165.
8. X.Feng, M.D.A. Thomas, T.W Bremner, B.J. Balcom, K.J. Folliard, Studies on lithium salts to mitigate ASR-induced expansion in new concrete: a critical review. /J.Cement and Concrete Research. 2005. Вип. 35(9). Стр. 1789–1796.
9. P.Krivenko, O. Petropavlovsky, O. Kovalchuk, A Comparative study on the influence of metakaolin and kaolin additives on properties and structure of of alkali-activated slag cement and concrete. J. Eastern European Journal of Enterprise Technologies. 1/6 (91) (2018) 33–39.

УДК 624.666.7:691.55

НОВІ ТЕНДЕНЦІЇ ПРИ ВІБРОПРЕСУВАННІ КОЛЬОРОВИХ НАДЖОРСТКИХ БЕТОННИХ СУМІШЕЙ

NEW TRENDS IN VIBROPRESSING OF COLORED SEMI-DRY CONCRETE MIXTURES

Каганов В.О., к.т.н. (Національний університет «Львівська політехніка»)

Kaganov V.O., Ph.D. (National University "Lviv Polytechnic")

Стаття присвячена проблемам вібропресування кольорових наджорстких бетонних сумішей в процесі індустріального виробництва фігурних елементів мостіння на сучасних бетоноформуючих комплексах в Україні. Отримані результати лабораторних досліджень використання в технологічному процесі багатокольорових наджорстких бетонних сумішей та застосування гідрофобізаторів нового покоління в фактурних шарах виробів бетонних тротуарних неармованих.

The abstract is devoted to the problems of vibration pressing of colored rigid concrete mixtures in the process of industrial production of curly paving elements on modern concrete-forming complexes in Ukraine. The results of laboratory studies of the use in the technological process of multi-colored superhard concrete mixtures and the use of new generation of water repellents in the textured layers of unreinforced concrete paving. The researches were conducted in the conditions of real factory production on the concrete forming technological line of the model MASA – 9 XL.1 in order to study the basic physical and technical characteristics of the finished concrete vibropressed products.

In addition, during the aforementioned scientific researches, was made the process of adding several colors to top textured layer of superhard concrete mixes of unreinforced sidewalk products at the same time in order to obtain a surface of figured paving elements of increased architectural expressiveness.

The publication pays considerable attention to the economic feasibility of using multi-colored concrete super-rigid mixtures and the process of using new generation of hydrophobizing additives for usage in working warehouses for vibrocompression on modern production lines. New ways of problem solving for increasing the operational and visual characteristics of vibropressed concrete paving products unarmored for the modern Ukraine conditions are outlined.

Ключові слова: вібропресування, наджорсткі бетонні суміші, фактурний

верхній шар бетону, фігурні елементи мостіння, вироби бетонні тротуарні неармовані, гідрофобізатори, хімічні добавки.

Vibrocompression, superhard concrete mixes, top textured layer concrete, figured paving elements, unarmored concrete paving products, water repellents, chemical additives.

Вступ. Реалії ХХІ століття ставлять перед виробниками вібропресованих бетонних виробів для мостіння тротуарно-дорожніх покриттів нові серйозні виклики. Питання урізноманітнення процесу естетичного сприйняття кольорових бетонних елементів мостіння тісно пов'язано з появою нових технологічних прийомів у виробництві заводської вібропресованої продукції. В Західній Європі та Україні в останні роки широко впроваджується сучасна технологія виробництва кольорових бетонних елементів мостіння за допомогою системи «Колор-Мікс» [1].

Аналіз основних досліджень. Дослідження щодо особливостей вібропресування наджорстких бетонних сумішей для виробів дорожньо-комунального призначення на основі сировини з інертних матеріалів українського походження та ряду імпортованих компонентів здійснювались у 2006 році професором Дворкіним Л.Й., кандидатами наук Житковським В.В. та Кагановим В.О. До теперішнього часу наукові дослідження були здійснені на базі аналізу лабораторних і камеральних вимірювань, а в даній статті вивчається комплекс досліджень та аналізуються результати отримані в процесі дослідно-промислової перевірки вібропресування наджорстких кольорових бетонних сумішей виготовлених на сучасному імпортованому бетонофурмувальному обладнанні.

Постановка мети і задач досліджень. Наукові дослідження в промислових умовах мали на меті вивчити вплив нових технологічних прийомів вібропресуванні багатокольорових фактурних шарів виробів бетонних тротуарних неармованих та дослідити вплив гідрофобізації на фізико-технічні властивості зазначених вище фігурних елементів мостіння, виготовлених на виробничих потужностях ТМ «МІЙ ДВІР».

Методика досліджень. Фахівцями кафедри будівельного виробництва Національного університету «Львівська політехніка» сумісно виробничо-технічним персоналом вимірювальної заводської лабораторії торгової марки ТМ «МІЙ ДВІР», на Львівщині в період з 2018 по 2019 роки виконали цілий комплекс досліджень в умовах реального виробництва. даною метою були відібрані натурні зразки, відформовані на вібропресувальному обладнанні моделі MASA – 9XL.1, згідно оновленої номенклатури виробів бетонних тротуарних неармованих спеціально розробленої для ТМ «МІЙ ДВІР». Було

порівняно основні фізико-технічні характеристики: міцність на стиск; міцність на розтяг при згині; водопоглинання з чотирьох партій натурних зразків, кожна з яких складалась з 18-ти досліджених елементів. Результати були отримані в процесі їх стандартних випробувань, що виконувались в умовах вимірювальної лабораторії, акредитованої в системи Держстандарту Мінекономрозвитку України. Результати досліджень вказаних вище параметрів та їхній аналіз представлено в матеріалах даної публікації.

Багаторічний досвід виробництва вібропресованих бетонних фігурних елементів мостіння спонукав спеціалістів ТМ «МІЙ ДВІР» на пошуки нових резервів при їхньому виготовленні. Особливістю новітнього технологічного прийому є той момент, що в процесі формування верхнього шару одночасно в суміш вводяться від двох до шести різнокольорових бетонних складів суміші, які створюють на поверхні готового вібропресованого виробу неповторний малюнок, що відтворює фактуру природнього каменя (граніту, мармуру, діориту та інших видів скельних порід). Досягається подібний ефект шляхом використання поетапної системи одночасної подачі на бетоноформувальну лінію двох або шести спеціально приготованих бетонних робочих складів різних кольорів, які в процесі виробництва хаотично потрапляють на поверхню верхнього шару бетону в металевій прес-матриці, де відбувається остаточний процес вібропресування верхнього шару бетонних фігурних елементів мостіння. В результаті даного технологічного прийому на верхній поверхні двошарового бетонного елемента мостіння фіксується попередньо забарвлений у різних місцях декількома відтінками кольорів бетонний шар, який і створює неповторний та жодного разу неповторюваний ефект природнього малюнку на готовому виробі з вібропресованого бетону.

Згадана вище технологія вібропресування двошарових кольорових бетонних сумішей з використанням системи «Колор-Мікс» вже знайшла своє широке розповсюдження в Німеччині, Данії, Нідерландах, США та в ряді інших країн світу. Зазвичай, дану систему подачі кольорових бетонних сумішей встановлюють на сучасних високопродуктивних бетоноформувальних комплексах, що виготовляються виробниками технологічного обладнання брендів MASA, HESS, KNAUER, SCHLOSSER (Німеччина), OMAG (Італія), Colambia (США) [2].

Станом на червень 2019 року на Україні ефективно експлуатується сучасний бетоноформувальний комплекс облаштований системою «Колор-Мікс», що розміщений в с.Милятичі Пустомитівського району Львівської області на території виробничої бази підприємства ТМ «МІЙ ДВІР», де виготовляється щомісячно більше 300 тис.кв.м вібропресованої бетонної готової продукції. На технологічній лінії, що функціонує на даному підприємстві змонтовано бетоноформувальне обладнання моделі MASA – 9XL.1, яка в стані в добу продукувати до 8000 кв.м бетонних виробів для

влаштування тротуарно-дорожніх дрібноштучних покриттів підвищеної якості. Досвід виготовлення широкої номенклатури виробів бетонних тротуарних неармованих (ВБТН) на Львівщині свідчить про високу якість виготовленої вібропресованої готової продукції з верхнім фактурним шаром, який відформовано з кольорового бетону на обладнанні системи «Колор-Мікс» підприємства ТМ «МІЙ ДВІР» (рис.1).



Рис. 1 Загальний вигляд технологічної лінії моделі MASA – 9 XL.1 на виробництві ТМ «МІЙ ДВІР»

Ще однією характерною особливістю новітніх підходів до виробництва високоякісної продукції на основі вібропресування наджорстких кольорових сумішей є використання в складах фактурного шару бетону гідрофобізаторів нового покоління. Якщо в попередні роки при виготовленні наджорстких бетонних сумішей для процесу заводського вібропресування застосовувались переважно хімічні добавки, які забезпечували лише процес

легковкладальності бетону у прес-форми матриці (пластифікатори I-ої групи) та стабілізатори кольору (додатки, які виключали появу висолів на поверхні готових виробів), то, в останній час, особливу увагу приділено забезпеченню щільності структури бетону і його водонепроникненню та іншим фізико-технічним властивостям фактурного шару вібропресованого бетону [3]. Практичний досвід спеціалістів кафедри будівельного виробництва та виробничо-технічного персоналу виміральної лабораторії ТМ «МІЙ ДВІР» свідчить, що оптимальний ефект можливо досягнути при використанні у вібропресованих наджорстких сумішах гідрофобізуючої добавки марки «Hidrotuge HW» виробництва «Sika» (Швейцарія). В результаті процесу введення з водою затворення в фактурну кольорову бетонну суміш від 0,4% до 0,8%, гідрофобізуючої добавки від маси зв'язного, показник водопоглинання готових фігурних бетонних елементів мостіння зменшувалось з 3,6% до 2,3%, що, в свою чергу, переконливо свідчить про підвищену щільність та покращене водопоглинання верхнього шару готових виробів для влаштування тротуарно-дорожніх покриттів [4].

В результаті здійснених в період з 2018 по 2019 роки порівняльних лабораторних досліджень було встановлено високу ефективність застосованих у верхньому фактурному шарі гідрофобізуючих добавок марки «Hidrotuge HW», що наочно прослідковується в результатах випробувань, наведених в табл.1. На поверхні готової продукції з вібропресованих ВБТН візуально можна побачити, що рідина на бетоні не просочується в тіло вібропресованого елемента мостіння, а саме: крапля рідини формується та зберігається без змін на фактурній поверхні досліджуваного вибору на протязі від одної до двох діб. Слід зауважити, що використовувати гідрофобізуючі добавки доцільно лише у робочих складах для фактурного шару бетону. В якості неорганічних пігментів для якісного забарвлення верхнього шару бетону ВБТН на обладнанні системи «Колор-Мікс» можливо використання продукції будь-якого європейського промислового виробника. Підприємство ТМ «МІЙ ДВІР» в своїй виробничій діяльності, зазвичай, застосовує неорганічні пігменти виробництва фірми «Bayer» (Німеччина) марки «Bayerferrox», однак можливо застосування пігментів інших виробників, а саме: Presheza (Чехія), Crizo (Франція), Rethmeier (Німеччина).

В комплексі з ефектом яскравого кольорового забарвлення бетонної поверхні готового вібропресованого виробу явище гідрофобізації фактурного шару бетону створює новітні можливості для таких виробів, як бетонні фігурні елементи мостіння. При цьому, крім підвищених експлуатаційних властивостей бетонної продукції за рахунок її гідрофобізації, значно покращується естетична виразність багатокольорових вібропресованих бетонних дрібноштучних елементів мостіння, що використовуються для влаштування привабливих варіантів покриттів при благоустрої міських та присадибних територій.

Таблиця 1

Результати випробувань вібропресованих виробів бетонних тротуарних неармованих (ВБТН)

Тип продукції ТМ «МІЙ ДВІР»	Позначення проб	Міцність на стиск, МПа		Водопогли- нання, %		Висота, см	
		взір- ця	сре- дня	взір- ця	сре- дня	взір- ця	сре- дня
ВБТН типу «Фалка», висотою 6 см, сірого кольору: на пластифікаторі «Sika» (BV-8) – нижній шар та фактурний шар бетону – «Sika» (BV-8)	1	51,8	54,2 (B45)	3,55	3,60	6,13	6,14
	2	51,0		3,65		6,13	
	3	51,0		3,63		6,06	
	4	55,2		3,29		6,09	
	5	60,3		3,37		6,13	
	6	59,5		3,62		6,12	
	7	53,8		3,58		6,13	
	8	49,6		3,92		6,25	
	9	55,2		3,75		6,18	
ВБТН типу «Гантель», висотою 6 см, червоного кольору: на пластифікаторі – нижній шар бетону; на пластифікаторі – «Sika» (BV-8) фактурний шар бетону на стабілізаторі Purcolor 5000 (ST) «Rethmeier»	1	60,3	61,4 (B50)	3,12	3,48	6,09	6,05
	2	55,2		3,50		6,05	
	3	56,6		3,62		5,95	
	4	64,0		3,46		6,01	
	5	62,5		3,70		6,06	
	6	66,1		3,58		5,99	
	7	61,0		3,58		6,09	
	8	59,5		3,54		6,15	
	9	67,6		3,41		6,04	
ВБТН типу «Новатор-міні» висотою 6 см, червоно-чорно-білого кольору на системі «Колор-Мікс» нижній шар бетону на пластифікаторі «Sika» (BV-8); фактурний шар бетону на гідрофобізаторі «Hidrotuge HW»	1	65,1	64,8 (B55)	2,15	2,35	6,10	6,07
	2	66,7		2,42		6,05	
	3	68,1		2,45		6,08	
	4	60,0		2,36		6,04	
	5	61,9		2,39		6,11	
	6	62,1		2,40		6,07	
	7	64,2		2,35		6,08	
	8	66,1		2,25		6,00	
	9	69,2		2,41		5,95	
ВБТН типу «Симфонія» висотою 6 см, коричнево-жовто-сірого кольору на системі «Колор-Мікс» нижній шар бетону на пластифікаторі «Sika» (BV-8); фактурний шар бетону на гідрофобізаторі «Hidrotuge HW»	1	60,2	66,5 (B55)	2,11	2,32	6,12	6,11
	2	69,7		2,48		6,13	
	3	67,5		2,45		6,05	
	4	64,1		2,50		6,06	
	5	63,9		2,36		6,09	
	6	66,0		2,30		6,10	
	7	68,5		2,26		6,22	
	8	69,1		2,17		6,19	
	9	70,2		2,28		6,01	

Необхідно відзначити, що ефект гідрофобізації верхнього шару з кольорового бетону суттєво підвищує яскравість та насиченість забарвлення поверхні готових вібропресованих фігурних елементів мостіння. Тобто неорганічні пігменти фірми «Baueg» (Німеччина) при використанні в згаданих вище складах наджорстких бетонних сумішах виглядають більш яскравими та насиченими, що сприяє покращенню загального сприйняття естетичного вигляду готової продукції та надає більше простору для дизайнерських рішень при влаштуванні благоустрою територій в твердому бетонному покритті.

Досвід набутий підприємством ТМ «МІЙ ДВІР», що знаходиться у Львівській області дає можливість констатувати, що вібропресування наджорстких кольорових бетонних сумішей на сучасному бетоноформувальному обладнанні моделі MASA – 9XL.1 створює практичні можливості для продукування принципово нового за своїми естетичними властивостями та покращеними фізико-технічними характеристиками виду бетонних виробів для влаштування тротуарно-дорожнього покриття, що використовуються, як для міського благоустрою, так і при облаштуванні вулично-проїжджої мережі та узбіччя автомобільних магістральних доріг [5].



Рис. 2. Приклади кольорової гами виробів бетонних тротуарних неармованих, виготовлених за допомогою технології «Колор-Мікс» на технологічному обладнанні ТМ «МІЙ ДВІР» моделі MASA – 9 XL.1

Слід зауважити, що влаштування покриттів із вібропресованих ВБТН створює суттєві резерви для економії коштів в процесі створення об'єктів благоустрою та експлуатації автодоріг з вулично-проїжджою мережею в стандартний семирічний міжремонтний цикл. Переваги у використанні дрібноштучних покриттів з ВБТН у порівнянні з традиційними асфальтобетонними покриттями за розрахунками фахівців кафедри будівельного виробництва Інституту будівництва та інженерних систем Національного університету «Львівська політехніка» становлять до 20% економії витрат на утримання та експлуатацію сучасних тротуарно-дорожніх покриттів.

Представлені на рис. 2 варіанти забарвлення системою «Колор-Мікс» фактурних шарів різнокольорових виробів бетонних тротуарних неармованих, які в комплексі з ефектом від додавання в наджорсткі бетонні суміші гідрофобізаторів нового покоління марки «Hidrotuge HW» закладають

основу для появи на будівельному ринку України абсолютно нового виду вібропресованих дрібноштучних фігурних елементів мостіння підвищеної якості для вирішення тротуарно-дорожніх покриттів при благоустрої міських територій.

Висновки. Сучасні естетичні уподобання в процесі влаштування тротуарно-дорожніх покриттів викликали до життя появу нових технологічних прийомів вібропресування наджорстких бетонних сумішей, а саме: різноманітного кольорового забарвлення фактурного шару бетону при ущільненні фігурних елементів мостіння за допомогою системи «Колор-Мікс» та застосування процесу гідрофобізації верхнього шару вібропресованих елементів спеціальними добавками нового покоління. Підвищення естетичної виразності та забезпечення покращення фізико-технічних експлуатаційних характеристик (водопоглинання, міцності на стиск та при розтягу) виробів бетонних тротуарних неармованих, виготовлених на виробничих потужностях ТМ «МІЙ ДВІР» дають можливість отримати гарантований прибуток у 2019 році, що має складати на 30% більшу економію від показників, які були досягнуті підприємством у минулому 2018 році.

1. Барсель, Р., 2007. 6-ти цветная красносмесительная система для компании «Calstone» в г.Трейси, Калифорния. *Журнал «Международное бетонное производство»*, 2, с.62-64.
2. Кремерс, М., 2007. Фирма «Redsun» вводит в эксплуатацию вторую высокопроизводительную машину для изготовления бетонных камней. *Журнал «Международное бетонное производство»*, 2, с.68-73.
3. Каганов, В.О., Назаревич, Б.Л., Кобів, М.В., 2004. Досвід використання хімічних добавок у вібропресованих бетонах». *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 520, с.87-90.
4. Каганов, В.О., 1998. Вибір оптимальної технології виготовлення бетонних і залізобетонних елементів мостіння тротуарів та доріг. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*, 360, с.107-111.
5. Каганов, В.О., 2009. Вплив конфігурації прес-форм для вібропресування фігурних елементів мостіння на якість заповнення матриць наджорсткою бетонною сумішшю. *Збірник наукових праць «Сучасні технології бетону»*, 72, с.119-125.

1. Barsel, R., 2007. 6-ti cvetnaya krasnosmesitelnaya sistema dlya kompanii «Calstone» v g.Trejsi, Kaliforniya. *Zhurnal «Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo»*, 2, s.62-64.
2. Kremers, M., 2007. Firma «Redsun» vvodit v ekspluatatsiyu vtoruyu vysokoproizvoditelnuyu mashinu dlya izgotovleniya betonnyh kamnej. *Zhurnal «Mezhdunarodnoe betonnoe proizvodstvo»*, 2, s.68-73.
3. Kaganov, V.O., Nazarevich, B.L., Kobiv, M.V., 2004. Dosvid vikoristannya himichnih dobavok u vibropresovanih betonah». *Visnik Nacionalnogo universitetu «Lvivska politehnika». Teoriya i praktika budivnictva*, 520, s.87-90.
4. Kaganov, V.O., 1998. Vibir optimalnoyi tehnologiyi vigotvlennya betonnih i zalizobetonnih elementiv mostinnya trotuariv ta dorig. *Visnik Nacionalnogo universitetu «Lvivska politehnika». Teoriya i praktika budivnictva*, 360, s.107-111.
5. Kaganov, V.O., 2009. Vpliv konfiguratsiyi pres-form dlya vibropresuvannya figurnih elementiv mostinnya na yakist zapovnennya matric nadzhorstkoyu betonnoyu sumishshyu. *Zbirnik naukovih prac «Suchasni tehnologiyi betonu»*, 72, s.119-125.

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОВІТРОВТЯГУВАЛЬНИХ ДОБАВОК В ШТУКАТУРКАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

EFFICIENCY OF AIR-ENTRAINING ADMIXTURES IN PLASTERS FOR SPECIAL APPLICATION

Ковальчук А.В., аспірант, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3532-4510>, **Константиновський, О.П.**, к.т.н., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7936-5699>, доцент, **Руденко І.І.**, к.т.н., старший науковий співробітник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5716-8259> (Науково-дослідний інститут в'язучих речовин і матеріалів, Кафедра технології будівельних конструкцій і виробів, Київський національний університет будівництва і архітектури)

Kovalchuk A.V., graduate student, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3532-4510>, **Konstantynovskiy, O.P.**, PhD, Associate Professor, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7936-5699>, **Rudenko I.I.**, PhD, Senior scientist, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5716-8259> (Scientific-Research Institute for Binders and Materials, Department of the Technology of building constrictions and products, Kyiv national university of construction and architecture)

Ключові слова: штукатурний розчин, перліт, базальтове волокно, повітровтягувальна добавка, середня густина, жаростійкість, порова структура

Plaster, perlite, basalt fibre, air-entraining admixture, average density, heat-resistance

Статтю присвячено дослідженню впливу повітровтягувальних добавок різної природи на порову структуру і фізико-механічні (середня густина, міцність на стиск) і жаростійкість системи «портландцемент - метакнолін - гранули з базальтового супертонкого волокна» з різним вмістом доменного шлаку. Отримані результати обумовлюють ефективність використання такої системи як основи жаростійких теплоізоляційних штукатурних розчинів.

The paper is devoted to effect of different types of air-entraining admixtures (AEA's) on physical-mechanical properties and heat-resistance as well as pore structure of artificial stone obtained in the system «portland cement – metakaolin - granules from basalt microfiber (granulate)», also containing blast furnace slag (BFS), after hydration. Investigation results were used for estimation of AEA's effectiveness in heat-resistance thermal-insulation

plasters. CEM I 52,5 R-N and CEM II/A-S 52,5 were used. It was shown that AEA's based on sodium alpha-olefine sulphonate (Ufapore TCO) is more effective for minimization of dry density of stone in comparison with one based on sodium lauryl sulfate (Berolan HS-30). Dry density of artificial stone based on CEM I 52,5 R-N and CEM II/A-S 52,5 decrease agreeably by 13 and 18 % when Ufapore TCO was used, and by 7 and 9 % in case of Berolan HS-30. Dry average density decreasing of artificial stone provides minimization of thermal conductivity and is caused by effect of AEA's on pore structure. Ufapore TCO and Berolan HS-30 provide increasing of uniformly distributed closed pores. The results demonstrate that thermal-conductivity of plaster can be regulated due to combination of AEA with granulate while perlite content decreases. The heat-resistance of the plaster based on CEM II/A-S 52,5 is higher in comparison with one based on CEM I 52,5 R-N. Revealed regularities can be used for further investigations of heat-resistant thermal-insulations based on cements with high volume of BFS .

Вступ. Сучасні тенденції сталого розвитку людства обумовлюють актуальність використання матеріалів, що забезпечують ефективне споживання енергоресурсів, відповідальне ставлення до екології навколишнього середовища та характеризуються високою якістю і функціональністю. До таких матеріалів відносяться теплоізоляційні штукатурні розчини, виготовлені на основі сухих будівельних сумішей (СБС), сфера застосування яких надзвичайно різноманітна - від утеплення побутових споруд до обробки поверхонь трубопроводів, паропроводів, печей, котлів, енергетичних агрегатів тощо.

Згідно нормативним вимогам ДСТУ Б В.2.7-126 та умовам використання до характерних ознак розчинових сумішей і розчинів на основі штукатурних СБС відносяться міцнісні і адгезивні властивості, теплопровідність, жаростійкість, вібростійкість, морозостійкість, зносостійкість, атмосферостійкість.

Аналіз останніх досліджень. Вибір в'язучої речовини в якості основи теплоізоляційних штукатурних розчинів залежить від їх застосування. Так, при утепленні побутових приміщень можливе використання як основи портландцементу типу І. Для забезпечення жаростійкості розчину при теплової ізоляції промислових об'єктів доцільно використання портландцементу, що містить гранульований доменний шлак (далі по тексту - шлак). До таких цементів згідно з ДСТУ Б В.2.7-46 відносяться портландцементи ІІ і ІІІ типу. Підвищення жаростійкості цементного каменю при збільшенні вмісту шлаку обумовлено зв'язуванням вільного портландиту $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в гідросилікати кальцію різної основності [1]. Крім того, використання цементів, які містять шлак, відповідає пріоритетним напрямкам розвитку цементної промисловості в частині покращення екології

навколишнього середовища. Заміна частини клінкеру в складі цементу добавкою шлаку сприяє зменшенню емісії CO₂ [2]. При цьому реалізується ефективна утилізація побічних продуктів виробництва, до яких належать і шлаки.

Аналіз базових рецептур штукатурних розчинів [3] вказав на доцільність вибору в якості заповнювача перліту, низький коефіцієнт теплопровідності якого ($\lambda = 0,047 - 0,093 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°C)}$) забезпечує високі теплофізичні властивості кінцевого матеріалу. Температурний діапазон застосування перліту (200 - 900 °C) обумовлює можливість його застосування в жаростійких розчинах [4].

Використання в складі СБС базальтової мікрофібри та продуктів з неї забезпечує покращення ряду властивостей розчинів: тріщиностійкість [5], адгезію до поверхні [6], міцність на згин [7], зносостійкість [8], морозостійкість [9] тощо. Допустима температура застосування виробів з базальтової мікрофібри (до 900 °C) надає підставу для її використання в жаростійких розчинах [4]. Гранули з базальтового супертонкого волокна (далі - гранулят), які є одним з продуктів на основі мікрофібри [10], характеризуються низьким коефіцієнтом теплопровідності ($\lambda = 0,033 \text{ Вт/(м}\cdot\text{°K)}$ при 25 °C), що дає можливість забезпечити необхідні теплофізичні властивості розчину наряду з перлітом.

Для захисту базальтового гранулята від дії лужного середовища доцільним є використання в складі СБС активної мінеральної добавки – метакаоліну, який швидко реагує з портландитом при гідратації цементу з утворенням гідросилікатів кальцію [11].

Ще одним фактором впливу на теплопровідність штукатурних розчинів є використання повітровтягувальних добавок за рахунок створення рівномірно розподілених пор в структурі матеріалу внаслідок залучення повітря [12]. До того ж зменшення вмісту перліту через введення повітровтягувальних добавок при забезпеченні необхідного рівня теплопровідності розчинів є економічно вигідним. Повітровтягувальні добавки мають різну хімічну природу. Наразі, на ринку України поширеними є повітровтягувальні добавки на основі альфа-олефин сульфоната натрію та лаурилсульфату натрію.

Таким чином, забезпечення експлуатаційних властивостей жаростійких теплоізоляційних штукатурних розчинів (теплопровідність, адгезія до поверхні, тріщиностійкість, атмосферостійкість тощо) є можливим за рахунок використання в їх складі перліту та модифікуючих добавок – мінеральної у вигляді гранулята і поверхнево-активної речовини (ПАР) з ефектом повітровтягнення.

Метою даної роботи є оцінка ефективності використання повітровтягувальних добавок різної хімічної природи в жаростійких теплоізоляційних штукатурних розчинах за впливом на фізико-механічні

властивості та жаростійкість, що реалізовано на модельних системах «портландцемент - метакаолін - гранулят» і «портландцемент - шлак - метакаолін - гранулят».

Матеріали і методика досліджень. В якості компонентів модельних систем використано портландцемент ПЦ І-500Р-Н (ПАТ «Івано-Франківськцемент»), портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш-500 (ПАТ «Волинь-Цемент»), високоактивний метакаолін (далі по тексту - ВМК) (ТОВ «Західна Каолінова компанія») і гранули з базальтового супертонкого волокна серії БГТ-4-6 (далі по тексту - гранулят) (ТОВ «Магма Індустрія»). Для досліджень використано повітровтягувальні добавки різної природи - Ufarogre TCO на основі альфа-олефін сульфоната натрію виробництва Bang&Bonsomer (Фінляндія) і Verolan HS-30 на основі лаурилсульфату натрію виробництва Verolan GmbH (Австрія).

Середню густину в сухому стані, міцність на стиск через 28 діб та жаростійкість розчинів, отриманих із гідратованих модельних систем, визначали на зразках-кубах з ребром 40 мм, виготовлених з тіста. Консистенція тіста забезпечувалась на рівні 86 - 90 мм по глибині занурення еталонного конусу згідно з ДСТУ Б В.2.7-239 шляхом підбору В/Т. Жаростійкість розчину визначали згідно з методикою [13] на зразках, які тверднули в нормальних умовах упродовж 28 діб і перед нагріванням висушувались до постійної маси при температурі 100-110 °С. Проектну міцність розчинів визначали після тверднення та сушіння. Нагрівання зразків здійснювали у муфельній печі, витримка при заданій температурі становила 1 год. Залишкова міцність розчинів визначалась як відношення міцності зразків, які були витримані при температурі 600 °С і після того 7 діб зберігались

в нормальних умовах ($t = (20 \pm 3) \text{ } ^\circ\text{C}$; $R.H. = (95 \pm 5) \%$), до проектної міцності.

Вивчення порової структури проведено на зразках штучного каменя після випробувань міцності за допомогою цифрового мікроскопа Dino-lite Pro при збільшенні у 500 разів.

Результати досліджень. Досліджено вплив повітровтягувальних добавок на порову структуру і властивості штучного каменя, отриманого при гідратації модельних систем. Склади досліджуваних модельних систем і властивості штучного каменя наведено в табл.1. Порову структуру бездобавочних і модифікованих повітровтягувальними добавками систем наведено на рис.1.

Отримані ефекти дії повітровтягувальних добавок обумовлені їх впливом на порову структуру штучного каменя. Без повітровтягувальної добавки структура є щільною з незначним об'ємом замкнутих пор, нерівномірно розподілених і утворених внаслідок залучення повітря гранулятом при перемішуванні цементного тіста (рис. 1а). Полегшення структури штучного каменя за рахунок збільшення об'єму залученого повітря обумовлює

незначне зменшення міцності на стиск немодифікованих модельних композицій по відношенню до нормованих показників марочної міцності цементу ПЦ І-500Р-Н.

Згідно з результатами добавка Ufapore TCO є більш ефективною за ефектом зменшення середньої густини штучного каменя у порівнянні з добавкою Berolan HS 30. Так, при використанні систем на основі ПЦ І-500 і ПЦ ІІ/А-Ш-500 спостерігається зменшення середньої густини відповідно на 13 і 17 % і при використанні добавки Berolan HS 30 - на 7 і 9 % відповідно. Зменшення середньої густини штучного каменя обумовлює відповідне зниження його теплопровідності.

Таблиця 1

Склади модельних систем і властивості штучного каменя

Склад модельної системи, %						В/Т	Середня густина в сухому стані	Міцність на стиск на 28 добу	Залишкова міцність
ПЦ І-500	ПЦ ІІ/А-Ш-500	ВМК	Гранулят	Ufapore TCO	Berolan HS 30				
94,7	-	5	0,3	-	-	0,48	1680	45,8	81
94,7	-	5	0,3	0,05	-	0,48	1370	25,3	74
94,7	-	5	0,3	-	0,05	0,48	1470	38,5	77
-	94,7	5	0,3	-	-	0,40	1700	47,2	90
-	94,7	5	0,3	0,05	-	0,42	1400	29,8	83
-	94,7	5	0,3	-	0,05	0,42	1550	40,3	86

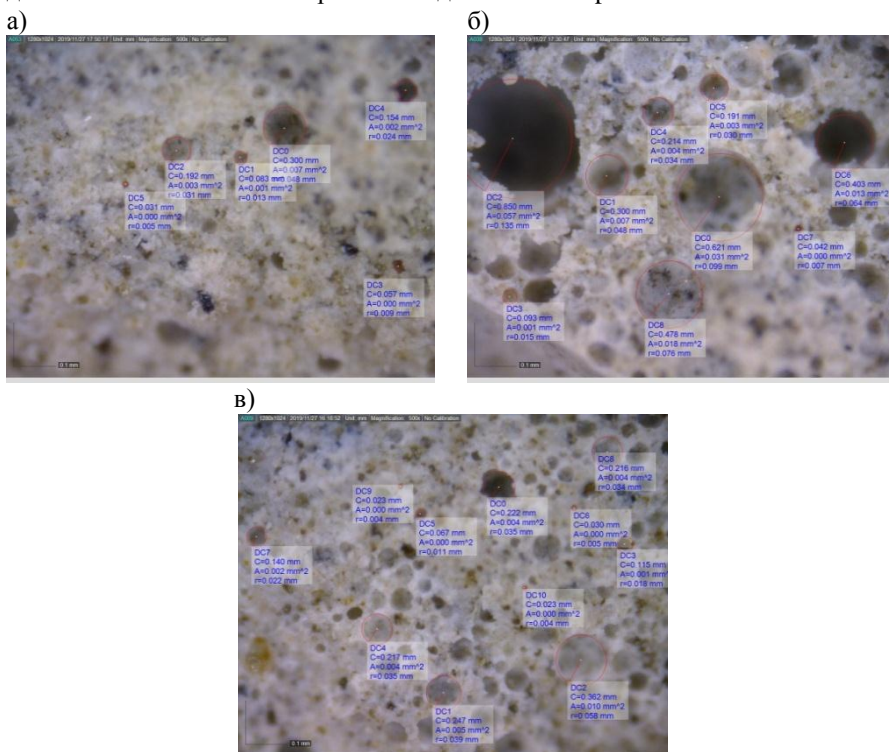
При використанні добавок Ufapore TCO (рис.2а) і Berolan HS 30 (рис.3а) в модельній системі на основі ПЦ І-500Р-Н в структурі штучного каменя спостерігається збільшення кількості рівномірно розподілених замкнутих пор радіусом 0,001 - 0,15 мм - на 25 і 17 % по відношенню до більш щільної структури бездобавочної системи (рис.1а).

При модифікації повітровтягувальними добавками систем на основі ПЦ ІІ/А-Ш-500 спостерігаються такі ж закономірності. Використання добавок Ufapore TCO і Berolan HS 30 призводить до збільшення вмісту рівномірно замкнутих пор на 21 і 15 % в структурі штучного каменя (по відношенню до бездобавочної модельної системи).

Перерозподіл порового простору при використанні повітровтягувальних добавок обумовлює зменшення середньої густини в сухому стані і відповідно теплопровідності штучного каменя. Отримані результати свідчать про можливість забезпечення регламентованих показників теплопровідності жаростійких теплоізоляційних розчинів при зменшеному вмісті перліту за рахунок використання повітровтягувальних добавок сумісно з гранулятом.

Міцнісні властивості моделей штукатурних розчинів зменшуються відповідно до зменшення середньої густини штучного каменю в сухому стані. Так, при використанні добавок Ufarore TCO і Berolan HS 30 зафіксовано зменшення міцності на стиск систем на основі ПЦ І-500Р-Н на 45 і 16 % і на основі ПЦ ІІ/А-Ш-500 на 39 і 15 %, на 28 добу

Виявлено підвищення жаростійкості систем на основі ПЦ ІІ/А-Ш-500 по відношенню до ПЦ І-500, що підтверджується більшими значеннями залишкової міцності: 83 - 90 % і 74 - 81 % відповідно (табл.1). Використання добавки Ufarore TCO призводить до зниження жаростійкості в порівнянні з добавкою Berolan HS 30. Так, залишкова міцність каменю на основі ПЦ І-500 зменшується з 81 до 74 % і на основі ПЦ ІІ/А-Ш-500 - з 90 до 83 %. При використанні добавки Berolan HS 30 залишкова міцність каменю на основі ПЦ І-500 і ПЦ ІІ/А-Ш-500 становить 77 і 86 % відповідно. Вища жаростійкість обумовлена більш щільною структурою штучного каменю при використанні добавки Berolan HS 30 в порівнянні з добавкою Ufarore TCO.



Висновки

1. За впливом на середню густину показано принципову можливість забезпечення регламентованих показників теплопровідності жаростійких теплоізоляційних штукатурних розчинів при зменшенні вмісту перліту за рахунок використання повітровтягувальних добавок сумісно з гранулятом. При цьому встановлено більшу ефективність добавки ПАР на основі альфа-олефін сульфоната натрію у порівнянні з лаурилсульфатом натрію внаслідок формування більшої кількості рівномірно замкнутих пор в структурі каменю. Це обумовлює можливість ефективного управління рядом властивостей розчинів (густина, міцність, теплопровідність, тощо).

2. Виявлено можливість підвищення жаростійкості штукатурних розчинів шляхом збільшення вмісту гранульованого доменного шлаку як добавки в складі портландцементу за умови створення ефективної структури штучного каменя. Отримані результати обумовлюють перспективність досліджень в напрямку визначення ефективності використання в якості основи жаростійких теплоізоляційних штукатурних розчинів цементів із підвищенням в їх складі вмісту шлакової складової, в т.ч. із залученням сполук лужних металів в процес структуроутворення.

Подяка

Автори висловлюють подяку за фінансову підтримку роботи, яка виконується в рамках бюджетного фінансування № 0118U002017, а також за розвиток теми досліджень по програмі наукового співробітництва COST Action CA15202 SARCOS “Self-healing As preventive Repair of COncrete Structures”. http://www.cost.eu/COST_Actions/ca/CA15202

1. В'язучі речовини: Підручник / [Р.Ф. Рунова, Ю.Л. Носовський, Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін]. - К.: Основа, 2012. - 448 с.
2. Кropyvnytska, T., Rucinska, T., Ivashchyshyn, H, Kotiv, R. (2019). Development of Eco-Efficient Composite Cements with High Early Strength, International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów (CEE 2019: Proceedings of CEE 2019), P. 211-218.
3. Цементные сухие строительные смеси: инновации в производстве и применении : [производственно - практическое пособие] / Г. Г. Дубровина, Ю. А. Гончаров, А. Г. Губская, Д. В. Назаров. - Минск: Ковчег, 2015. - 247 с.
4. Рунова Р.Ф., Гоц В.І., Гелевера О.Г., Константиновський О.П., Носовський Ю.Л., Піпа В.В. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів: Підручник – 3-є вид. – К.: Основа, 2017. – 528 с.
5. Li Z. Contrast experiment of common crack repair method and comprehensive new repair technology research / Z. Li, N. Bu, X. Cong // Appl. Mech. Mater., 2012. - 166–169 (2012) 1587–1591.
6. Белова Т.К. Штукатурные растворы с улучшенными эксплуатационными свойствами на основе модифицированных сухих строительных смесей // Т.К. Белова Вестник Евразийской науки, 2019. - №3. - Vol.11.

7. Gurieva V.A. / V.A. Gurieva, T.C. Belova // *Procedia Engineering*, 2016. - 150. - pp.2163-2167.
 8. C. Jiang, S. Huang, Y. Zhu, Y. Lin, D. Chen, Effect of polypropylene and basalt fiber on the behavior of mortars for repair applications, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2016 (2016) 1–11, <https://doi.org/10.1155/2016/5927609>.
 10. Funke H. The durability and performance of short fibers for a newly developed alkali-activated binder / H. Funke, S. Gelbrich, L. Kroll // *Fibers*, 2016. – 4(1) – 11. pp.1-8, <https://doi.org/10.3390/fib4010011>.
 11. Basalt micro fiber for brands that want more. Available at: <http://magmawool.com/index.html>.
 12. Kovalchuk O. Studying the influence of metakaolin on self-healing processes in the contact-zone structure of concretes based on the alkali-activated Portland cement / [O. Kovalchuk, O. Gelevera, V. Ivanychko] // *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*, 2019. – Vol. 5-6. – P. 33-40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181501>.
 13. Wieloch. M. The effects of pore structure of air-entrained cement-based mortars on freezing and thawing deterioration / M Wieloch, AJ Klemm // *Proceedings of the PROBE Conference, Glasgow Caledonian University, Glasgow*, 2005. – pp.517 - 526.
 14. Композиційні цементи для жаростійких матеріалів / [М.А. Саницький, Б.В. Федунь, О.Р. Позняк, Р.Я. Крайник] // *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. - «Хімія, технологія речовин та їх застосування». - 2000. - №414.
1. Viazhuchi rehovyny: Pidruchnyk / [R.F. Runova, Yu.L. Nosovskyi, L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin]. – K.: Osnova, 2012. – 448 s.
 2. Kropyvnytska, T., Rucinska, T., Ivashchysyn, H, Kotiv, R. (2019). Development of Eco-Efficient Composite Cements with High Early Strength, *International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów (CEE 2019: Proceedings of CEE 2019)*, P. 211–218.
 3. Tsementnye sukhye stroytelnye smesy: ynnovatsyy v proyzvodstve y pryomenenyy : [proyzvodstvenno - praktycheskoe posoby] / H. H. Dubrovyna, Yu. A. Honcharov, A. H. Hubskaia, D. V. Nazarov. – Mynsk: Kovcheh, 2015. – 247 s.
 4. Runova R.F., Hots V.I., Helevera O.H., Konstantynovskyi O.P., Nosovskyi Yu.L., Pipa V.V. *Osnovy vyrobnytstva stinovykh ta ozdoblivalnykh materialiv: Pidruchnyk – 3-ye vyd.* – K.: Osnova, 2017. – 528 s.
 5. Li Z. Contrast experiment of common crack repair method and comprehensive new repair technology research / Z. Li, N. Bu, X. Cong // *Appl. Mech. Mater.*, 2012. – 166–169 (2012) 1587–1591.
 6. Belova T.K. Shtukaturnye rastvory s uluchshennymi ehkspluatatsyonnymi svoystvamy na osnove modyfytsirovannykh sukhykh stroytelnykh smesei // T.K. Belova *Vestnyk Evraziyskoi nauky*, 2019. - №3. – Vol.11.
 7. Gurieva V.A. / V.A. Gurieva, T.C. Belova // *Procedia Engineering*, 2016. – 150. – pp.2163–2167.
 8. C. Jiang, S. Huang, Y. Zhu, Y. Lin, D. Chen, Effect of polypropylene and basalt fiber on the behavior of mortars for repair applications, *Adv. Mater. Sci. Eng.*, 2016. pp. 1–11, <https://doi.org/10.1155/2016/5927609>.

9. Funke H. The durability and performance of short fibers for a newly developed alkali-activated binder / H. Funke, S. Gelbrich, L. Kroll // *Fibers*, 2016. – 4(1) – 11. pp.1–8, <https://doi.org/10.3390/fib4010011>.
10. Basalt micro fiber for brands that want more. Available at: <http://magmawool.com/index.html>.
11. Kovalchuk O. Studying the influence of metakaolin on self-healing processes in the contact-zone structure of concretes based on the alkali-activated Portland cement / [O. Kovalchuk, O. Gelevera, V. Ivanychko] // *Eastern-European journal of Enterprise Technologies*, 2019. – Vol. 5–6. – P. 33–40. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.181501>.
12. Wieloch. M. The effects of pore structure of air-entrained cement-based mortars on freezing and thawing deterioration / M Wieloch, AJ Klemm // *Proceedings of the PRoBE Conference, Glasgow Caledonian University, Glasgow, 2005.* - pp.517 – 526.
13. Kompozytsiini tsementy dlia zharostiikykh materialiv / [M.A. Sanytskyi, B.V. Fedun, O.R. Pozniak, R.Ia. Krainyk] // *Visnyk Natsionalnoho universytetu «Lvivska politehnika»*. – «Khimiia, tekhnolohiia rechovyn ta yikh zastosuvannia»». – 2000. – №414.

ФОРМУВАННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО ТОНКОШАРОВОГО ПОКРИТТЯ НА ПОРТЛАНДЦЕМЕНТІ, ЩО ВМІЩУЄ ПОРОЖНИСТІ АЛЮМОСИЛІКАТНІ ТА СКЛЯНІ МІКРОСФЕРИ

FORMATION OF MICROSTRUCTURE THERMAL INSULATION THIN-LAYER COVERAGE ON PORTLAND, CONTAINING ALUMOSILICATE AND GLASS MICROSPHERES

Костюк Т.О., д.т.н., доц., Бондаренко Д.О., к.т.н., Деденьова О.Б., Плахотніков К.В., Наливайко Т.Т. (Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків)

T. Kostuk, D. Bondarenko, E. Dedenyova, K. Plakhotnikov, T.Nalivayko (Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv)

Робота присвячена розробці складу тонкошарового теплоізоляційного покриття на портландцементі, що містить порожнисті алюмосилікатні і скляні мікросфери з додаванням комплексної добавки для підвищення фізико-механічних властивостей. Застосування цієї добавки сприяло додатковому синтезу на поверхні мікросфер кристалогідратів.

Abstract. Using the physical and chemical analysis, we have investigated the possibility to obtain a dense and crack-resistant composite material filled with aluminosilicate and glass microspheres based on Portland cement and a complex additive which purposefully enhances each of the mentioned properties. During the molding of a composite material, in which particles of a filler and a binder have the same size in microns, micro-reinforcing fibrous additives will not be effective because their particles are larger than filler's particles. To specify the conditions for the formation of a micro-reinforcing layer of ettringite needles and for increasing the density of the cement matrix structure, relevant theoretical and experimental studies were carried out and a complex additive consisting of calcium nitrate and chloride, carboxymethylcellulose and plasticizer was proposed. Based on the physical and chemical analysis performed, it has been discovered that adding a complex additive facilitates the compacting of the structure of the cement matrix through the additional synthesis of crystalline hydrates: ettringite, calcium hydrochloroaluminate, calcium hydroxychloride, and calcium hydrosilicates of the felt-like structure, and this improves physical and mechanical properties of a composite material based on Portland cement.

Ключові слова: портландцемент, мікроструктура, теплоізоляція, тонкошарове, покриття, мікросфери, кристалогідрати, гель-агрегати. Portland cement, microstructure, heat insulation, thin coat, fine coat, micro-ferry, crystallalogy, gel aggregate.

Вступ. Одним із перспективних напрямів отримання ефективних теплоізоляційних матеріалів є одержання покриттів на основі мінеральних в'язучих з порожніми мікронаповнювачами неорганічного походження [1-5]. Такі матеріали мають високі теплоізоляційні властивості, проте в силу своєї структури, мають низькі фізико-механічні характеристики, а також високе водопоглинення, низьку адгезійну міцність. Тому розробка тонкошарового теплоізоляційного покриття на мінеральному в'язучому з алюмосилікатних і скляних мікросфер з високими теплоізоляційними і фізико-механічними характеристиками є актуальною задачею [6-8].

Аналіз останніх досліджень.

Покриття на мінеральному в'язучому у тонких шарах (1-2 мм) з достатньо високими фізико-механічними характеристиками отримати досить складно, оскільки більшість води затворення уходить у пористу мінеральну підложу (бетон, цегла, тощо) та випаровується. Недостатня кількість води зменшує гідратацію в'язучого, що знижує щільність і міцність покриття. Для вибору ефективних добавок проаналізовано роботи вчених, що займалися розробкою добавок для цементів і механізмом їх дії: В.Б. Ратінова, Ф.М. Іванова, М.М. Сичова, О.П. Мчедлова-Петросяна, В.І. Бабушкіна, Л.Б. Сватовської, Н.Н. Шангіної, П.Г. Комохова, В.Г. Батракова, А.М. Пługіна, А.В. Ушерова-Маршака, Л.Й. Дворкіна, М.А. Саницького, П.В. Кривенко, Р.Ф. Рунової, В.Л. Чернявського, А.А. Пługіна, О.С. Шинкевич та ін.

Постановка мети та задач досліджень.

Для підвищення щільності і міцності тонкошарового теплоізоляційного покриття на портландцементі було запропоновано робочу гіпотезу: підвищення фізико-механічних властивостей тонкошарового теплоізоляційного покриття на цементному в'язучому і наповнювачі з порожністими мікросферами можливе за рахунок мікроармування цементної матриці голками еtringіту, що в більш повній мірі формується у просторі цементної матриці, утворюючи каркасну структуру шляхом введення добавок другого класу першої групи за класифікацією В.Б. Ратінова (нітратів і хлоридів кальцію) та водоутримуючої добавки.

Мета дослідження – розробка складу тонкошарового теплоізоляційного покриття на портландцементі та наповнювача з алюмосилікатних та скляних порожніх мікросфер з високими фізико-механічними і теплоізоляційними властивостями, шляхом модифікації в'язучого солями кальцію та

водоутримуючою добавкою.

Методика дослідження.

Експериментальні дослідження виконувалися з використанням методу планового експерименту. Фізико-механічні дослідження проведені згідно з нормативними документами. Електроповерхневі властивості визначались методом сепарації часточок у полі високої напруги та методом адсорбції кольорових індикаторів активними центрами поверхні за допомогою спектрофотометрії. Для визначення фізико-механічних властивостей було застосовано стандартні методи досліджень згідно з нормативними документами на дані матеріали. Для підтвердження результатів зміцнення мікроструктури цементної матриці обрано методи електронної мікроскопії та інфрачервоної спектрометрії.

Основний зміст роботи та її результати.

Адсорбційні властивості алюмосилікатних порожнистих мікросфер у цементному композиті значною мірою визначаються балансом їх кислотно-основних центрів, що співвідносяться також зі знаком поверхневого заряду. В цементному камені і розчині для забезпечення найбільшої структурної міцності повинен бути дотриманий баланс між позитивно і негативно зарядженими поверхнями усіх дисперсних частинок і кристалогідратів [9]. Введення у цементну структуру алюмосилікатних мікросфер розміром від 5 до 150 мкм позитивно впливатиме на формування більш щільної структури як на ранніх стадіях, так і у більш пізніші строки гідратації, бо створюватимуть електрогетерогенні контакти не тільки з частинками цементу і гіпсу, а й гідратами алюмінатної фази клінкеру [10-11]. Підвищення фізико-механічних характеристик тонкошарового теплоізоляційного покриття отримано шляхом мікроармування голками еtringіту, що підтвердило наукову гіпотезу, рис. 1-2.

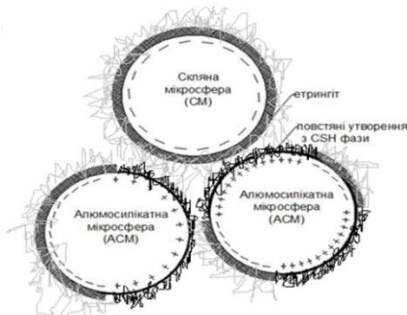


Рис. 1. Схематичне зображення армування структури покриття еtringітовими голками (мікрофіброю)

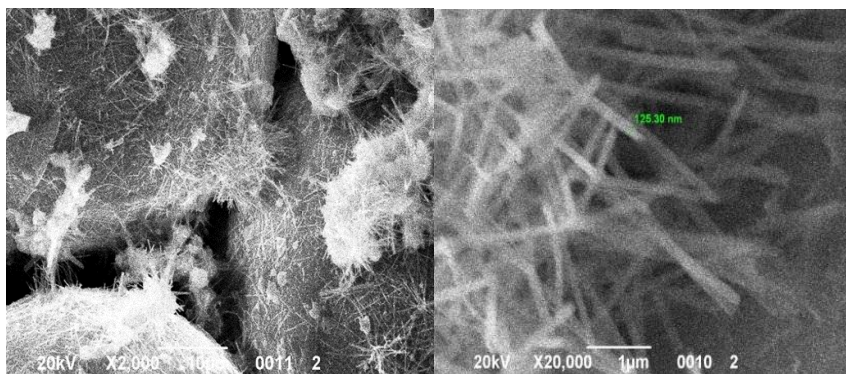


Рис. 2. Електронна мікрофотографія структури тонкошарового теплоізоляційного покриття з мікроарматурою з голок еtringіту (підтвердження робочої гіпотези)

Вибір комплексної хімічної добавки (CaCl_2 , CaNO_3) дозволив додатково синтезувати на поверхні мікросфер кристалогідрати у вигляді гелю-агрегатів CSH, голок еtringіту та ламінарних структур C_4AH_{13} , а також ущільнити структуру тонкошарового теплоізоляційного покриття кристалогідратами з алюмінатної фази клінкеру [12], що підтверджено результатами електронно-мікроскопічних досліджень, рис.3-4.

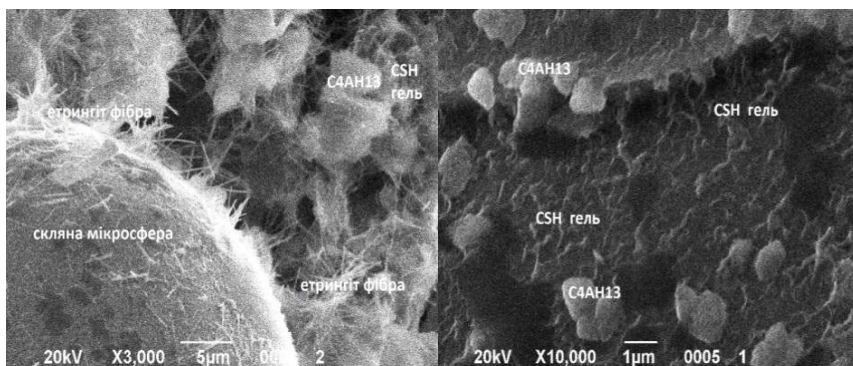


Рис. 3. Електронна мікрофотографія скляної мікросфери у складі композиту ліворуч – мікросфера вкрита волокнами еtringіту, праворуч – збільшена поверхня мікросфери з кристалогідратними новоутвореннями.

В результаті експериментальних досліджень із застосуванням методу математичного планування експерименту підібрано раціональне співвідношення метилцелюлози і комплексної хімічної добавки в композиті на основі портландцементу в межах 0,05% – 0,09 % від цементу, а вміст комплексної хімічної добавки – від 1% до 2,8%.

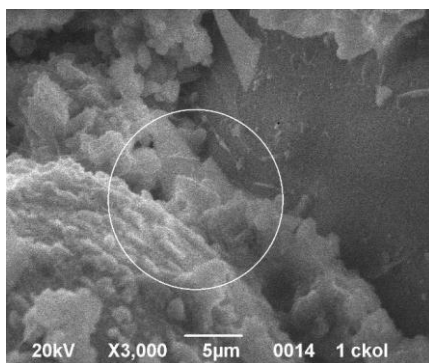


Рис. 4. Ущільнення структури тонкошарового покриття з алумосилікатними та скляними мікросферами кубиками і призмами кристалогідратів з алюмінатної фази клінкеру.

Експериментально підтверджено результати теоретичних досліджень і визначено фізико-механічні характеристики зразків тонкошарового теплоізоляційного покриття. На рис. 5. наведено результати випробувань зразків тонкошарового теплоізоляційного покриття: міцності на стиск, на розтяг при вигині, адгезійної міцності, паропроникності.

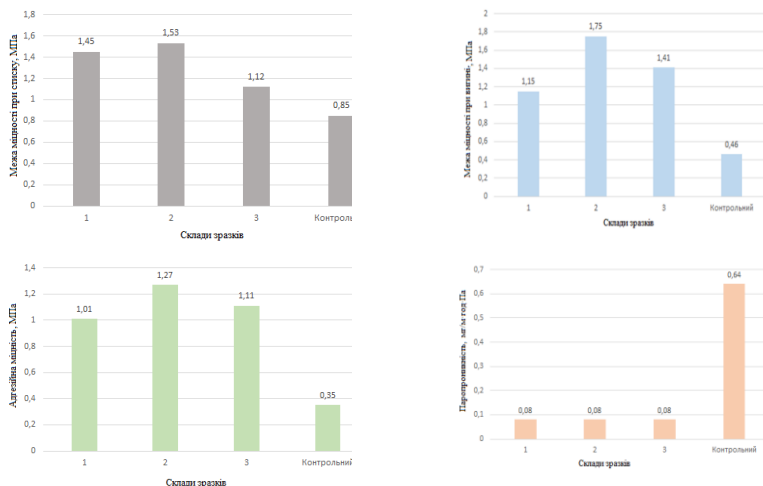


Рис. 5. Результати випробувань зразків тонкошарового теплоізоляційного покриття.

Встановлено, що для отримання тонкошарового теплоізоляційного покриття на основі алумосилікатних та скляних порожніх мікросфер на цементному в'язучому з підвищеними фізико-механічними

характеристиками доцільно використовувати комплексну добавку, що складається з метилцелюлози, нітрату та хлориду кальцію, пластифікатору.

Структурні перетворення, що відбулися в процесі гідратації в'язучого з запропонованою комплексною добавкою, досліджувались методом інфрачервоної спектроскопії (ІЧС) та за допомогою електронного мікроскопу, що дозволило розкрити характер міжмолекулярних і внутрішньо-молекулярних взаємодій і отримати інформацію про структуру сполучень. Для дослідження було приготовлено три зразки у вигляді затверділої суміші строком 28 діб. Зразок № 1 - портландцемент; зразок № 2 - портландцемент зі скляними мікросферами і комплексною хімічною добавкою; зразок № 3 - портландцемент з алюмосилікатними мікросферами і комплексною добавкою, рис.6.

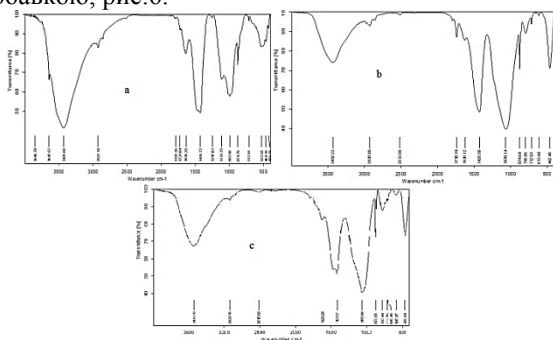


Рис. 6. Інфрачервоний спектр зразків:

а – зразок №1, б – зразок №2, с – зразок №3

Знімки, що отримані за допомогою електронного мікроскопу, найбільш чітко показують характер взаємного розташування структурних елементів у цементному композиті, морфологію фаз, розміри і форму кристалів та їх зрощення [15-16]. Для вивчення структурних особливостей формування композиту на мікрорівні було обрано склад що містить портландцемент, алюмосилікатні та скляні мікросфери та комплексну хімічну добавку. На електронних фотознімках, рис.7, показано мікроструктуру композиту.

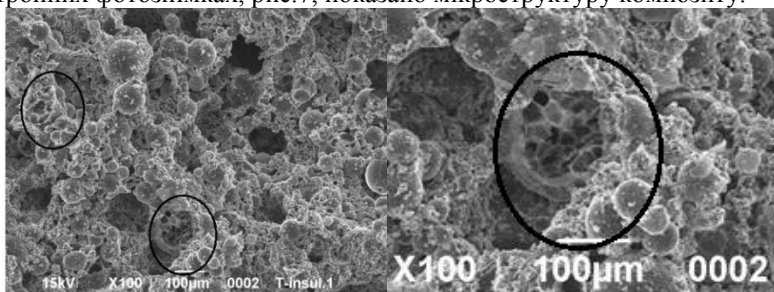


Рис.7. Електронні знімки мікроструктури композиту

З рисунка видно, що порожнисті мікросфери мають різний діаметр від 10 до 150 мкм, з'єднані між собою кристалогідратними структурами цементного каменю. Структура матеріалу щільна за рахунок раціональної упаковки мікросфер різного діаметру, порожнин і тріщини немає. На виділеному фрагменті знімку чітко видно, що всередині мікросфера являє собою багатокамерну капсулярну структуру, що дозволяє сприймати внутрішні напруги і ефективно перерозподіляти їх між цементною матрицею і наповнювачем. Це забезпечує підвищення міцнісних показників композиту і забезпечує підвищення тріщиностійкості покриття. На каркасі еtringіту, що зшиває своїми голками мікросфери, формуються пластини і блоки з гідросилікатів кальцію, утворюються зіркові агрегати гідрохлоралюмінатів кальцію (в центрі знімку): гідрооксихлориду кальцію у вигляді подовжених призм, гідронітроалюмінатів кальцію у вигляді гексагональних тонких пелюсток, рис.8. Зустрічаються окремі кубики кальциту та пластинки вапна.

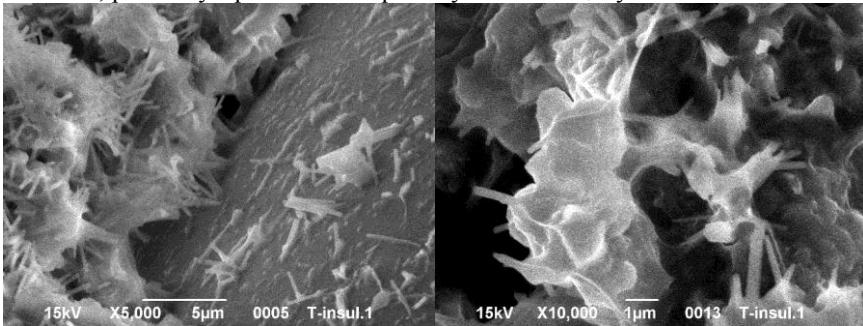


Рис. 8. Електронні знімки кристалогідратної фази мікроструктури композиту

На рис.8 при збільшенні цементного каменю у $\times 10.000$ разів добре видно структурні одиниці пелюсток гідроалюмінатної фази (гідронітроалюмінатів, гідрохлоралюмінатів), голки еtringіту, повстяні скупчення гідросилікатів.

На знімках контрольного зразка композиту №1, рис. 9, при послідовному збільшенні видно, що структура зразка більш пухка і неоднорідна. Гідратовані алюмінатнокальцієві фази складають окремі агрегації у вигляді подовжених призм упереміж з агрегаціями гідросилікатів (більш темні скупчення у центрі та ліворуч, зверху знімку) та вапна (світлі блочні пластини ліворуч, зверху знімку).

Таким чином, на основі проведеного фізико-хімічного аналізу встановлено, що додавання комплексної добавки сприяє ущільненню структури цементної матриці шляхом додаткового синтезу кристалогідратів: еtringіту, гідрохлоралюмінату кальцію, гідрооксихлориду кальцію та гідросилікатів кальцію повстяної структури, що в свою чергу підвищує фізико-механічні показники композиту на основі портландцементу.

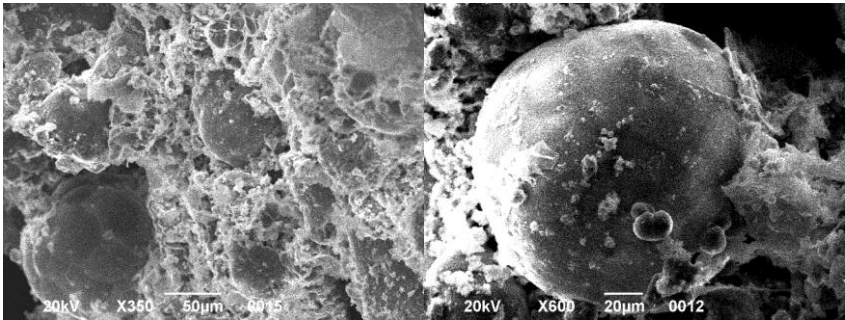


Рис. 9. Електронні знімки мікроструктури контрольного зразка композиту

Висновки.

Таким чином встановлено, що додавання комплексної добавки сприяє ущільненню структури цементної матриці шляхом додаткового синтезу кристалогідратів: еtringіту, гідросилікатів кальцію повстяної структури, гідрохлоралюмінату кальцію, гідрооксихлориду кальцію, що сприяє підвищенню фізико-механічних показників теплоізоляційного покриття.

1. Плахотніков К.В., Бондаренко О.І., Деденьова О.Б. Можливість застосування теплоізоляційних матеріалів у тонких шарах в сучасному будівництві//Науковий вісник будівництва №3 (89) – Харків 2017 т.89, № 3, с.226-229.
2. Захарченко П.В., Півень Н.М. Вивчення процесів структуроутворення в тонкошарових покриттях. /Строительные материалы и изделия, 2009, №5-6, с. 27-28.
3. Thermal Insulation Materials. Material Characterization, Phase Changes, Thermal Conductivity [Text] / NETZSCH-Gerätebau GmbH. – Germany. Selb. – 2016. – 23 p.
4. Yurkov, A.L. Properties of Heat-Insulating Materials (A Review) [Text] / A.L. Yurkov, L.M. Aksel'rod. Refractories and Industrial Ceramics. – Vol. 46.– Issue 3, 2008/.-P. 170–174.
5. Ryzhenkov, A.V. Syntactic Foams Efficiency with the Use of Various Microspheres for Heat Supply Equipment and Pipelines Heat Insulation [Text] / A.V. Ryzhenkov, S.I. Pogorelov, N.A. Loginova, E.V. Belyaeva, A.Y. Plestsheva. Modern Applied Science.– Vol. 9. – №. 4. – 2015 P. 319-327.
6. [6]. Liang, J.Z. Effects of the glass bead content and the surface treatment on the mechanical properties of polypropylene composites [Text] / J.Z. Liang, C.B. Wu. Journal of Applied Polymer Science. – Vol. 123. – №. 5. – 2012. - P.3054-3063.
7. Valášek, P. Polymeric composite based on glass powder - usage possibilities in agrocomplex [Text] / P. Valášek, M. Müller. Scientia Agriculturae Bohemica. – Vol. 44. – №. 2. – 2013. - P.107-112.
8. Ku, H. Tensile Tests of Phenol Formaldehyde Glass-Powder-Reinforced Composites: Pilot Study [Text] / H. Ku, Trada M. Cecil, P. Wong. Journal of Applied Polymer Science. – Vol. 116. – №. 1. 2010– P. 10-17.
9. Плугін А.А., Костюк Т.О., Бабушкін В.І. Управління міцністю дрібнозернистого бетону одразу після формування на основі урахування електроповерхневих

властивостей його складових / Науковий вісник будівництва.- Харків: ХДТУБА, ХОТВАБУ, 1999.- Вип.7.-С.63-67.

10. Бабушкин В.И., Плугин А.А., Костюк Т.А., Матвиенко В.А. Влияние активных поверхностных центров на прочности свежееотформованных мелкозернистых бетонов // Науковий вісник будівництва .- Харків: ХДТУБА; ХОТВАБУ, 1998.-Вип. 5.- С.85-88

11. Plugin A.A; Savchuk Y.Y.; Liutyi V.A.; Kostyuk T.O.; Bondarenko D.O. Penetrating Fine-Clinker and Clinkerless Cement-Based Waterproof Compounds // 20 Internationale Baustofftagung, 12-14 September 2018, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. - Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2018. - P 3.02. – Band 2. - P.1063-1071.

12. Interaction of Portland cement hydration products with complex chemical additives containing fiberglass in moisture-proof cement compositions / O.I.Demina, A.A.Plugin, E.V.Dedenyova, D.O.Bondarenko, T.A.Kostuk // Functional Materials, 24, No.3 (2017), p. 415-422.

13. Плюснина І.І. Інфрачервоні спектри мінералів / Плюснина І.І. – М.: МГУ, 1977. – 175с.

14. Накамото К. ІК спектри і спектри КР неорганічних і координацій-них сполук / Накамото К. – М.: Мир, 1966 – 411 с.

15. Рид С. Електронно-зондовий мікроаналіз / Рид С.- Пер. з англ. – М. : Мир, 1979.- 427 с.

16. Горшков В.С. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ/ Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г.- М.: Высшая школа.-1981.- 335с.

**ДОВГОВІЧНІСТЬ ДЕКОРАТИВНИХ КЕРАМЗИТОБЕТОНІВ ДЛЯ
ТОНКОСТІННИХ КОНСТРУКЦІЙ ГІДРОТЕХНІЧНИХ СПОРУД**

**DURABILITY OF DECORATIVE EXPANDED CLAY LIGHTWEIGHT
CONCRETE FOR THIN-WALLED CONSTRUCTIONS OF HYDRAULIC
STRUCTURES**

Кривяков С.О., д.т.н., доц., ORCID 0000-0002-0800-0123, Дудник Л.В., асп., ORCID 0000-0002-9969-8941, Петричко С.М., к.т.н., доц., ORCID 0000-0003-3956-0382 (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Kroviakov S.O., Dr. Sci., assistant professor, ORCID 0000-0002-0800-0123, Dudnik L.V., graduate student, ORCID 0000-0002-9969-8941, Petrychko S.M., PhD., assistant professor, ORCID 0000-0003-3956-0382 (Odessa state academy of civil engineering and architecture)

Встановлено, що міцність, морозостійкість і водонепроникність декоративних керамзитобетонів із залізоокисними пігментами практично не відрізняються від рівня даних показників якості контрольних бетонів для тонкостінних споруд. За цифровими фото досліджено зміну кольору декоративних керамзитобетонів під впливом сонячного світла.

Mechanical properties, durability and color range of decorative expanded clay lightweight concrete were investigated. Red and yellow iron-oxide synthetic pigments were applied. Lightweight concrete was manufactured using two technologies. The first series was manufactured using traditional technology. The second series was produced using technology of treatment porous gravel with cement slurry. The slurry was prepared by introducing 30% cement into water.

It is established that the strength, frost resistance and water tightness of expanded clay lightweight concretes with iron oxide pigments practically does not differ from strength, frost resistance and water tightness of control concretes. The compressive strength of expanded clay lightweight concrete is increased by 1-1,5 MPa by treating the porous gravel with cement slurry. The density of lightweight concrete is also increased by 10-20 kg/m³ when treating porous gravel.

The color range of decorative expanded clay lightweight concrete was analyzed using digital photos in the RGB color scheme. Concretes at the age of 2 years have been investigated. It is established that the decorative properties of lightweight concrete with iron oxide pigments during their operation in

sunlight are reduced. Concrete with a yellow pigment is more resistant to sunlight. Thus, modified decorative expanded clay lightweight concretes have sufficient durability and can be used in thin-walled constructions of hydraulic structures, including floating reinforced concrete structures (floating docks, hotels, houses).

Ключові слова: керамзитобетон, пігмент, пластифікатор, обробка гравію, довговічність, морозостійкість, водонепроникність.
Expanded clay concrete, pigment, plasticizer, gravel treatment, durability, frost resistance, water tightness.

Вступ. Керамзитобетони та інші легкі бетони на пористих заповнювачах достатньо широко використовуються в сучасному гідротехнічному будівництві, зокрема у конструкціях тонкостінних плавучих залізобетонних споруд. Основними типами таких споруд є нафто- і газовидобувні платформи, плавучі доки та їх аналоги, плавучі дома і готелі. Для частини подібних споруд, в першу чергу готелів і домів, важливим є їх естетичний вигляд, покращити який можливо за рахунок використання декоративних кольорових бетонів. Обов'язковою умовою ефективності застосування декоративних керамзитобетонів у тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд є забезпечення їх довговічності в типових для даних споруд умовах експлуатації. Як показує накопичений досвід [1], основними показниками якості, що забезпечують довговічність бетону в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, є водонепроникність і морозостійкість (за умови забезпечення сульфатостійкості). Для декоративних бетонів важливим показником також є збереження кольору в часі. Відповідно, задача підвищення довговічності декоративних керамзитобетонів є актуальною і може бути вирішена за рахунок застосування ефективних рецептурно-технологічних методів впливу на структуру композиту.

Аналіз останніх досліджень. На сучасному етапі розвитку матеріалознавства одним з найперспективніших напрямків застосування бетонів на пористих заповнювачах у гідротехнічному будівництві є залізобетонне суднобудування. За рахунок зменшення маси конструкцій підвищується вантажопідйомність залізобетонних плавучих споруд [2]. Також при використанні легкого бетону замість важкого покращуються умови перебування людей та роботи технологічного обладнання на споруді [3]. За рахунок меншої різниці між середньою густиною легкого бетону і води у порівнянні з різницею густини важкого бетону і води конструкції з легкого бетону є більш ефективними за показником співвідношення міцності матеріалу до його ваги [4].

З легкого і важкого бетону сьогодні будуються переважно великогабаритні стоянкові плавучі споруди, для яких є важливою довговічність та ремонтпридатність. Це газо-нафтовидобувні платформи та інші споруди для освоєння ресурсів континентального шельфу, плавучі доки, готелі, ресторани, будинки, причали [1,5]. Наприклад для понтонів і головного прогону плавучого мосту Nordhordland Bridge (Норвегія, 1994 р.) був використаний легкий бетон класу LC55 [6]. Для плавучої нафтової платформи Heidrun (Норвегія, 1996 р.) використовувався легкий бетон класу LC60 з середньою густиною 1950 кг/м³. [7]. З 1998 року в США для потреб військово-морських сил використовуються залізобетонні плавучі пірси з легкого бетону міцністю 48 МПа. Задана довговічність бетонних пірсів – 100 років, що вдвічі більше в порівнянні з металевими плавучими пірсами [8]. З легкого бетону міцністю 35 МПа та з середньою густиною близько 2000 кг/м³ збудовані плавучі ворота дамби Braddock (США, 2000 р.) [9]. На завершальній стадії будівництва знаходиться плавучий спуско-підйомний комплекс MPU Heavy Lifter (Німеччина). Для даної споруди використано легкий бетон класу LC35/38 з середньою густиною 1600 кг/м³. Зниження густини бетону досягнуто за рахунок застосування крупного пористого заповнювача і частково пористого піску [2].

Залізобетонне суднобудування розвинуто і в Україні. На Херсонському заводі «Паллада» вже більше 80 років будуються плавучі доки та інші бетонні плавучі споруди. Накопичено певний досвід застосування суднобудівного керамзитобетону, який показав високу довговічність при експлуатації в Баренцовому і Каспійському морях [10].

Поліпшення декоративних властивостей суднобудівного бетону шляхом зміни його кольорової гами при забезпеченні довговічності матеріалу в типових для плавучих залізобетонних споруд умовах експлуатації підвищує конкурентоспроможність цих споруд на світовому ринку. Є певний досвід експериментального застосування важких декоративних суднобудівних бетонів [11]. Проте дослідження, присвячені використанню декоративних легких бетонів для тонкостінних гідротехнічних споруд, зокрема залізобетонних плавучих, практично відсутні. Тобто задача забезпечення довговічності декоративних керамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд є актуальною.

Мета досліджень. Метою досліджень є забезпечення довговічності, механічних і декоративних властивостей керамзитобетонів із залізоокисними пігментами для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд, зокрема плавучих залізобетонних, за рахунок застосування пластифікаторів і технологічного прийому обробки керамзитового гравію цементною суспензією.

Методика досліджень. В якості компонентів легкого бетону використовувалися: сульфатостійкий портландцемент ССПЦ 400-Д0 виробництва ПАТ «Івано-Франківськцемент»; керамзит марки П125 виробництва Одеського керамзитового заводу фракції 5-10 мм з насипною густиною 660 кг/м^3 ; митий кварцовий пісок з $M_{кр}=2,4$; добавка суперпластифікатор С-3.

Для зміни кольорової гама бетону застосовувалися неорганічні залізоокисні синтетичні пігменти торгової марки Baufarboх: червоний пігмент IOX R03, основна речовина цього пігменту – Fe_2O_3 , а також жовтий пігмент IOX Y02, основна речовина даного пігменту – $\text{FeO}(\text{OH})$.

Дослідження властивостей декоративних конструкційних керамзитобетонів проводилися на двох паралельних серіях зразків.

Перша серія виготовлялася за «традиційною» для керамзитобетонів технологією. Тобто у змішувач послідовно подавалася вода з розчиненою в ній добавкою-пластифікатором і керамзитовий гравій. Далі, після 30..45 секунд перемішування (насичення гравію водою), подавався цемент і пісок. Залізоокисні пігменти розмішувалися з цементом в сухому стані завчасно, що було необхідно для забезпечення рівномірності їх розподілу в матеріалі. Таким чином, пористий керамзитовий гравій насичувався переважно водою, а загальна тривалість перемішування складала в середньому п'ять хвилин.

Друга серія виготовлялася з застосуванням технологічного прийому обробки пористого гравію цементною суспензією. Для цього у змішувач послідовно подавалося 90% від необхідної на заміс кількості води з розчиненими в ній 50% добавки-пластифікатору та 30% від необхідної кількості цементу і ця суспензія перемішувалася приблизно одну хвилину. Далі у змішувач, де знаходилася суспензія, подавався керамзитовий гравій і перемішування продовжувалося ще одну хвилину. Після цього подавалася решта цементу, пісок і решта води з розчищеною добавкою (теж 50%). В даному випадку залізоокисні пігменти розмішувалися завчасно з 70% цементу в сухому стані, тобто у суспензію, яка використовувалася для насичення гравію, пігмент не вводився. Розділення введення добавки-пластифікатору на дві порції було обумовлено тим, що цементна суспензія виготовлялася не зі всією кількістю необхідного цементу для розподілу пігменту в його решті. Таким чином пористий керамзитовий гравій насичувався цементною суспензією, а загальна тривалість перемішування складала в середньому шість хвилин, тобто на хвилину довше, ніж для «традиційної» технології.

У кожній серії виготовлялося по п'ять партій зразків з різними видами та кількістю пігменту. Всі досліджені бетони мали рівну кількість портландцементу (500 кг/м^3), керамзитового гравію (670 л/м^3) і добавки С-3 (0,8% від маси цементу). Для забезпечення рівного розрахункового об'єму суміші кількість піску корегувалася в залежності від застосування у складі легкого бетону пігменту. Один склад у кожній серії був контрольним (№1),

тобто без пігменту. Склади №2 і №3 включали червоний пігмент, 10 і 20 кг/м³ відповідно, склади №4 і №5 – жовтий пігмент, також відповідно 10 і 20 кг/м³. Склади всіх досліджених керамзитобетонів наведені в таблиці 1.

Результати досліджень. Фізико-механічні та декоративні властивості досліджених керамзитобетонів, а також В/Ц сумішей наведені у таблиці 2.

Таблиця 1

Склади досліджених керамзитобетонів

№ партії в кожній з серій	№1, контроль	№2, червоний	№3, червоний	№4, жовтий	№5, жовтий
Цемент	500 кг/м ³				
Керамзит	670 л/м ³				
Пісок	665 кг/м ³	655 кг/м ³	645 кг/м ³	653 кг/м ³	641 кг/м ³
С-3	4 кг/м ³				
Пігмент	-	Fe ₂ O ₃ 10 кг/м ³	Fe ₂ O ₃ 20 кг/м ³	FeO(OH) 10 кг/м ³	FeO(OH) 20 кг/м ³
Вода	174/177 л/м ³	184/179 л/м ³	184/180 л/м ³	177/179 л/м ³	183/183 л/м ³

* у чисельнику кількість води при приготуванні суміші за традиційною технологією, у знаменнику – при застосуванні обробки керамзиту суспензією

Таблиця 2

Фізико-механічні та декоративні властивості досліджених декоративних і контрольних керамзитобетонів

Показник	склад №1	склад №2	склад №3	склад №4	склад №5
В/Ц	0,347 / 0,354	0,368 / 0,358	0,367 / 0,360	0,354 / 0,358	0,366 / 0,366
Міцність при стиску, МПа	31,3 / 32,0	31,6 / 32,3	27,9 / 28,5	32,1 / 33,6	29,4 / 31,3
Міцність на розтяг при згині, МПа	6,14 / 6,11	5,94 / 6,14	6,07 / 6,13	6,31 / 6,36	6,13 / 6,17
Середня густина при рівноважній вологості, кг/м ³	1790 / 1810	1770 / 1785	1770 / 1780	1770 / 1780	1770 / 1780
Морозостійкість	F500				F450
Водонепроникність	W8/ W10	W10/ W10	W8/ W10	W10/ W10	W8/ W10

* у чисельнику значення показника при приготуванні суміші за традиційною технологією, у знаменнику – при застосуванні обробки керамзиту суспензією

Встановлено, що зміна технології приготування легкобетонної суміші з традиційної на технологію з обробкою гравію цементною суспензією не вплинула на В/Ц. По окремих складах різниця у значеннях В/Ц сумішей між

серіями не перевищує 2%. Введення пігменту викликає необхідність підвищення В/Ц суміші на 2.6% через додаткову водопотребу цього дрібнодисперсного компоненту, що є відомим у бетонознавстві ефектом [12].

При введенні як червоного, так і жовтого залізоокисного пігменту в кількості 10 кг/м^3 міцність при стиску досліджених керамзитобетонів практично не змінюється не зважаючи на деяке підвищення В/Ц. При введенні пігменту у кількості 20 кг/м^3 міцність при стиску декоративних керамзитобетонів знижується приблизно на 8% у порівнянні з міцністю контрольних складів.

За рахунок обробки керамзиту цементною суспензією міцність при стиску досліджених керамзитобетонів зростала на 1..1,5 МПа, що знаходиться в межах від 4 до 7%, тобто лише дещо вище точності визначення показника. Це можна пояснити тим, що завдяки необхідності введення пігменту з цементом для обробки гравію використовувалася суспензія з відносно невеликою кількістю в'язучого, а також тим, що в бетонах використовувався гравій фракції 5-10 мм, тобто доволі дрібний. Відомо, що у міру зменшення розміру часток відносно маломіцного пористого заповнювача вплив його міцності на міцність легкого бетону знижується [13]. Відповідно попередня обробка керамзиту цементною суспензією, яка підвищує міцність заповнювача, несуттєво впливає на міцність композиту, але незначна позитивна тенденція спостерігається для всіх складів.

Міцність на розтяг при згині декоративних керамзитобетонів практично не відрізнялася від міцності контрольних складів. Це можна пояснити тим, що В/Ц суміші мало впливає на величину міцності на розтяг, а також властивістю пігментів частково виконувати роль мікронаповнювачів [11,14].

Середня густина досліджених декоративних керамзитобетонів на $20\text{-}30 \text{ кг/м}^3$ нижче густини аналогічних контрольних складів, що пояснюється різним В/Ц сумішей. Бетони на обробленому суспензією гравії мали на $10\text{-}15 \text{ кг/м}^3$ більшу середню густину завдяки кращому насиченню контактної зони керамзиту в'язучим.

Також визначалася морозостійкість і водонепроникність керамзитобетонів як основні показники, що забезпечують довговічність матеріалів у тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, зокрема плавучих. Встановлено, що майже всі досліджені бетони мають високу морозостійкість – F500. Морозостійкість на рівні F450, що теж можна вважати високим рівнем даного показника, зафіксована лише для складу №5, тобто при введенні жовтого пігменту в кількості 20 кг/м^3 . При цьому технологічна операція попередньої обробки керамзиту цементною суспензією не впливає на морозостійкість досліджених легких бетонів.

Водонепроникність контрольних і декоративних керамзитобетонів знаходилася в одному діапазоні – W8..W10, що можна пояснити здатністю пігменту виконувати роль мікронаповнювача, який також сприяє

підвищенню водонепроникності бетону [11, 14]. За рахунок технологічної операції обробки керамзиту цементною суспензією водонепроникність контрольних складів, а також декоративних бетонів з максимальною кількістю залізоокісного пігменту підвищувалася на одну марку. Для декоративних бетонів з кількістю пігменту 10 кг/м^3 вплив обробки гравію на рівень W з досяжною для методики «мокрої плями» точністю не виявлено.

Для декоративних бетонів важливою характеристикою є не лише їх фізико-механічні властивості, а і кольорова гама, яка в значній мірі визначає якість і функціональну придатність даних матеріалів. Для уникнення ефекту суб'єктивності при аналізі декоративних властивостей використовувалася така методика. Зразки фотографувалися при однаковому освітленні і на цифровій фотографії відокремлювалася область верхньої при фотографуванні грані зразку. У даній області проводилося усереднення кольору завдяки застосуванню фільтру «average» програми Photoshop. Для цього усередненого кольору визначалося його значення за схемою RGB. Насиченість червоним кольором оцінювалася через відсоток червоної складової (Red) у сумі трьох складових кольорів схеми R+G+B. Насиченість жовтим кольором у схемі RGB оцінювалася через відсоток суми червоної і зеленої складової (Red+Green) за умови що $R \approx G$. Для кожного складу аналізувалося по шість зразків, після чого вираховувалися середні значення показників кольору.

«Початкова» кольорова гама керамзитобетонів аналізувалася у віці 28 діб. Встановлено, що при підвищенні кількості пігменту насиченість відповідного кольору в бетоні (червоного або жовтого) прогнозовано зростає. Також встановлено, що використання технології обробки керамзиту цементною суспензією дозволяє досягнути дещо кращих показників кольору для декоративних керамзитобетонів [15]. Це можна пояснити більшим вмістом пігменту у цементно-піщаній матриці керамзитобетону, тому що насичення гравію проводилося суспензією без пігменту. При традиційній технології приготування суміші частина пігменту залишається в порожнинах і контактній зоні заповнювача. А саме цементно-піщана матриця визначає колір бетону.

Як відомо, для всіх видів декоративних бетонів важливим є питання стійкості кольору в часі під впливом сонячного світла та інших впливів [12]. Цю стійкість також можна вважати показником довговічності для даних бетонів. Для оцінки стійкості декоративних властивостей керамзитобетонів у часі проводилося порівняння кольору зразків, що перебували 2 роки під впливом сонячного випромінювання, та кольору аналогічних зразків, що зберігалися без доступу світла. Порівняння з «початковою» кольоровою гамою за цифровими фото не є коректним через фактичну неможливість забезпечення однакового освітлення зразків в різний період. Зразки фотографувалися у мокрому стані, що відповідає умовам експлуатації гідротехнічних споруд. Слід зазначити, що кольорова гама зразків у сухому стані є природно світлішою за гаму мокрих зразків, але загальна тенденція

зміни кольору у бетонах в мокрому та сухому стані є аналогічною. Значення кольорів поверхні зразків декоративних керамзитобетонів (у мокрому стані) за схемою RGB після 2-х років зберігання наведені у таблиці 3.

Аналіз наведених у таблиці 3 даних показує, що після 2-х років експонування на відкритому сонці просторі кольорова гама декоративних бетонів стала відчутно світлішою. Сума R+G+B, яка характеризує загальну ступінь відбивної здатності поверхні, для бетонів з червоним пігментом підвищилася на 12-16% (у порівнянні зі зразками, які зберігалися у темноті), а для бетонів з жовтим пігментом – на 22-25%. Але для «жовтих» складів №4 і №5 загальний рівень жовтого кольору (Red+Green) у зразках, що зберігалися у темноті та під відкритим природним сонячним світлом є близьким – 83-84% для бетонів з кількістю FeO(OH) 10 кг/м³ та 86-87% для бетонів з кількістю FeO(OH) 20 кг/м³. Для «червоних» складів №2 і №3 насиченість червоним кольором зразків, що зберігалися під відкритим природним сонячним світлом, є на 3-4% меншою в порівнянні з насиченістю зразків бетонів, що зберігалися у темноті.

Таблиця 3

Значення кольорів поверхні зразків декоративних керамзитобетонів за схемою RGB після 2-х років зберігання

Показник	склад №1	склад №2	склад №3	склад №4	склад №5
зберігання у темноті					
складова Red	71/70	102/103	119/118	82/84	85/83
складова Green	67/66	39/39	39/40	65/67	66/73
складова Blue	53/51	31/29	31/27	30/30	24/25
сума R+G+B	191/187	172/171	188/185	177/181	175/181
зберігання під відкритим природним сонячним світлом					
складова Red	75/76	114/108	137/130	101/100	102/102
складова Green	73/72	50/45	50/45	83/87	84/85
складова Blue	54/53	34/32	35/34	37/38	31/30
сума R+G+B	202/201	198/185	222/209	221/225	217/217

* у чисельнику значення показника при приготуванні суміші за традиційною технологією, у знаменнику – при застосуванні обробки керамзиту суспензією

Таким чином, декоративні властивості керамзитобетонів з залізоокисними пігментами при їх експлуатації під сонячним світлом знижуються, що в першу чергу проявляється у «вицвітанні» їх поверхні. Але для початково

більш світлих бетонів з жовтим пігментом рівень жовтого кольору зберігається краще, ніж рівень червоного кольору у початково темніших бетонах з червоним пігментом.

Висновки. Міцність, морозостійкість і водонепроникність декоративних керамзитобетонів з залізоокисними пігментами практично не відрізняються від рівня даних показників якості контрольних бетонів аналогічних складів. За рахунок технологічного прийому обробки керамзиту цементною суспензією як методу покращення сумісної роботи заповнювача і матриці дещо зростає міцність при стиску досліджених керамзитобетонів, а також на величину до однієї марки зростає їх водонепроникність. Також за рахунок обробки гравію дещо покращується насиченість кольору декоративних бетонів, яка аналізувалася за цифровими фото. При цьому обробка не впливає на величину В/Ц сумішей рівної рухомості, на міцність керамзитобетонів на розтяг при згині, а також на їх морозостійкість.

Модифіковані декоративні керамзитобетони, приготовані з використанням технологічного прийому обробки пористого гравію, мають достатню довговічність, за рахунок чого можуть бути використані в тонкостінних конструкціях гідротехнічних споруд, для яких існує потреба придання певного кольору для отримання необхідної архітектурної виразності, зокрема в конструкціях залізобетонних плавучих споруд.

При експлуатації під сонячним світлом декоративні властивості досліджених керамзитобетонів знижуються, що в першу чергу проявляється у «вицвітанні» їх поверхні. Для більш світлих бетонів з жовтим пігментом рівень жовтого кольору під сонцем зберігається краще, ніж рівень червоного кольору у початково темніших бетонах з червоним пігментом.

1. Кровяков С.О. Наукові та практичні основи підвищення довговічності модифікованих бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2018, №73, С.73-80.
2. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology. Science press, Beijing, China, 2017. 280 p.
3. Мішутін А.В., Кровяков С.О. Досвід і перспективи застосування бетонів на легких заповнювачах для конструкцій тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2016, №61. С.278-284.
4. Проектирование, технология и организация строительства композитных плавучих доков. А.С. Рашковский, Н.Г. Слуцкий, В.Н. Конов и др. Николаев: НУК, РАЛ-полиграфия, 2008. 614 с.
5. Harmon K.S. Recent research projects to investigate mechanical properties of high-performance lightweight concrete. Theodore Bremner Symposium on High Performance Lightweight Concrete. Thessalonika, Greece: 2003. pp. 131-150.

6. Johnsen H., Helland S., Hemdal E. Construction of Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland Cable Stayer Bridge. Proceedings of International symposium on structural lightweight aggregate concrete. Sandefjord, 1995. pp. 373-379.
 7. Helland S., Aarstein R., Maage M. In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance. Structural Concrete (J. of fib). 2010, Vol. 11, No.1. pp. 15-24.
 8. LaNier M.W., Wernli M., Easley R., Springston P.S. New technologies proven in precast concrete modular floating pier for US Navy. PCI journal, 2005, July-August, Vol.50. Iss. 4. pp. 76-99.
 9. Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. Woodhead publishing, 2019. 442 p.
 10. Мишутин А.В., Мишутин Н.В. Повышение долговечности бетонов морских железобетонных плавучих и стационарных сооружений. Одесса: Эвен, 2011. 292 с.
 11. Петричко С.Н., Мишутин А.В. Состав и свойства декоративных судостроительных бетонов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2012, №48, частина 2, С. 37-42.
 12. Huber J. Decorative Concrete. Menlo Park, Calif.: Sunset Pub. Co., 2007. 192 p.
 13. Ицкович С.М., Чумаков Л.Д., Баженов Ю.М. Технология заполнителей бетона. М.: Высшая школа, 1991. 272 с.
 14. Лейдерман Л.П. Свойства декоративных бетонов с использованием железозакисных пигментов Челябинского завода ЖБИ №1. Автореф. дис. канд. тех. наук 05.23.05. Челябинск, 2003. 19 с.
 15. Кровяков С.О., Петричко С.М., Дудник Л.В., Ткаченко Г.Г. Декоративний конструкційний керамзитобетон на обробленому цементною суспензією гравії. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури, 2017, №66, С.66-71.
1. Krovvyakov S.O. Naukovi ta praktychni osnovy pidvyshchennya dovhovichnosti modyfikovanykh betoniv na lehkykh zapovnyuvachakh dlya tonkostinnykh hidrotekhnichnykh sporud. Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 2018, №73, S.73-80.
 2. Liu G., Li H. Offshore platform integration and floatover technology. Science press, Beijing, China, 2017. 280 p.
 3. Mishutin A.V., Krovvyakov S.O. Dosvid i perspektyvy zastosuvannya betoniv na lehkykh zapovnyuvachakh dlya konstruksiy tonkostinnykh hidrotekhnichnykh i transportnykh sporud. Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 2016, №61. S.278-284.
 4. Proektirovanie, tekhnologiya i organizatsiya stroitelstva kompozitnykh plavuchikh dokov. A.S. Rashkovskiy, N.G. Slutskiy, V.N. Konov i dr. Nikolayev: NUK, RAL-poligratsiya, 2008. 614 s.
 5. Harmon K.S. Recent research projects to investigate mechanical properties of high-performance lightweight concrete. Theodore Bremner Symposium on High Performance Lightweight Concrete. Thessalonika, Greece: 2003. pp. 131-150.
 6. Johnsen H., Helland S., Hemdal E. Construction of Stovset Free Cantilever Bridge and the Nordhordland Cable Stayer Bridge. Proceedings of International symposium on structural lightweight aggregate concrete. Sandefjord, 1995. pp. 373-379.
 7. Helland S., Aarstein R., Maage M. In-field performance of North Sea offshore platforms with regard to chloride resistance. Structural Concrete (J. of fib). 2010, Vol. 11, No.1. pp.15-24.

- 8.** LaNier M.W., Wernli M., Easley R., Springston P.S. New technologies proven in precast concrete modular floating pier for US Navy. PCI journal, 2005, July-August, Vol.50.Iss. 4. pp. 76-99.
- 9.** Mindess S. Developments in the formulation and reinforcement of concrete. Woodheadpublishing, 2019. 442 p.
- 10.** Mishutin A.V., Mishutin N.V. Povyshenie dolgovechnosti betonov morskikh zhelezobetonnykh plavuchikh i statsionarnykh sooruzheniy. Odessa: Even, 2011. 292 s.
- 11.** Petrychko S.N., Mishutin A.V. Sostav i svoystva dekoratyvnykh sudostroytelnykh betonov. Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 2012, №48, chastyna 2, S. 37-42.
- 12.** HuberJ. Decorative Concrete. Menlo Park, Calif.: Sunset Pub. Co., 2007.192 p.
- 13.** Itskovich S.M., Chumakov L.D., Bazhenov YU.M. Tekhnologiya zapolniteley betona. M.: Vysshaya shkola, 1991. 272 s.
- 14.** Leyderman L.P. Svoystva dekorativnykh betonov s ispolzovaniyem zhelezookisnykh pigmentov Chelyabinskogo zavoda ZHBI №1. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk 05.23.05. Chelyabinsk, 2003. 19 s.
- 15.** Krovyakov S.O., Petrychko S.M., Dudnyk L.V., Tkachenko H.H. Dekoratyvnyy konstruktsiynyy keramzytobeton na obroblenom tsementnoy suspenziyeyu hraviyi. Visnyk Odeskoi derzhavnoi akademii budivnytstva ta arkhitektury, 2017, №66, S.66-71.

ЩОДО ЗАСТОСУВАННЯ БАЗАЛЬТОВОЇ МІКРОФІБРИ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНОГО АВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНУ

ON THE APPLICATION OF BASALT MICROFIBERS TO INCREASE THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF HEAT-INSULATING AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

Лаповська С.Д., д.т.н., заступник директора з наукової роботи (Державне підприємство «Український науково-дослідний і проектно-конструкторський інститут будівельних матеріалів та виробів «НДІБМВ», м. Київ)

Lapovska S. D., doctor of technical sciences, (Deputy Director for Research, State Enterprise "Ukrainian Research and Design Institute of Building Materials and Products "NDIBMV", Kyiv)

Наведено результати досліджень щодо дисперсного армування теплоізоляційного автоклавного газобетону (АГБ) базальтовою мікрофіброю, модифікованою силіцидом цирконію. Метою роботи є отримання АГБ зниженої густини з підвищеними характеристиками міцності, зокрема на розтяг і вигин. Застосування базальтової мікрофібри для армування міжпорових перегородок дозволяє створити структурний зміцнюючий каркас ніздрюватобетонного масиву, і, таким чином, стабілізувати основні характеристичні властивості АГБ — міцність та середню густину, підвищити опір розтягуючим напруженням, підвищити тріщиностійкість, знизити усадочні явища та крихкість матеріалу.

Проаналізовано результати, отримані з використанням різних видів базальтової мікрофібри для армування АГБ густиною 150 кг/м^3 . Визначено, що найбільшу хімічну та термічну стійкість в умовах автоклавної обробки має фібра на основі базальту, модифікованого силіцидом цирконію.

Встановлено, що введення базальтової мікрофібри до складу ніздрюватобетонної суміші позитивно впливає на спучування масивів та швидкість набору пластичної міцності. Введення до складу ніздрюватого бетону базальтової мікрофібри дозволяє підвищити його міцнісні характеристики при збереженні значення середньої густини.

Annotation. The results of studies of dispersed reinforcement of heat-insulating autoclaved aerated concrete (AAC) with basalt microfiber modified

with zirconium silicide are presented. The aim of the work is to obtain a low density AAC with enhanced strength characteristics, in particular tensile and bending. The use of basalt microfiber for reinforcing inter-pore partitions allows to create a structural reinforcing frame of a cellular concrete mass, and thus stabilize the main characteristic properties of AAC - strength and average density, increase resistance to tensile stresses, increase crack resistance, reduce shrinkage phenomena and brittleness of the material.

The results obtained using various types of basalt microfiber for reinforcing AAC with a density of 150 kg/m^3 are analyzed. It has been determined that the highest chemical and thermal stability under autoclave conditions has fiber based on basalt modified with zirconium silicide.

It has been established that the introduction of basalt microfiber into the composition of the cellular concrete mixture has a positive effect on the expansion of massifs and the rate of plastic strength gain. After autoclaving, the obtained AAC are characterized by compressive strength up to 0.425 MPa and tensile strength during bending up to 0.128 MPa; control compositions had indicators of 0.371 MPa and 0.104 MPa, respectively. The value of the average density in the dry state for reinforced AAC was $(153.6-155.5) \text{ kg/m}^3$, and for unreinforced - 154.7 kg/m^3 . The introduction of basalt microfiber into the cellular concrete allows to increase its strength characteristics while maintaining the average density value.

Ключові слова: Автоклавний газобетон, армування, базальт, мікрофібра, міцність на розтяг при вигині, середня густина.
Autoclaved aerated concrete, reinforcement, basalt, microfiber, tensile strength during bending, average density.

Вступ. Сучасні тенденції розвитку будівельного комплексу все більше орієнтовані на підвищення конкурентоспроможності, розробку і впровадження принципово нових конструктивних рішень. Все це забезпечує ресурсозбереження та знижене енергоспоживання, і, як наслідок, високі техніко-економічні показники і споживчі якості будівель.

Оптимізація витрат забезпечується використанням міцних, стійких, високоякісних будівельних матеріалів і системних рішень.

Крім економії, іншою важливою вимогою споживачів є екологічність будівельних матеріалів і виробів, яка може бути досягнута шляхом використання відповідних матеріалів для виробництва та підтримки суворого замкнутого технологічного режиму. В процесі виробництва і експлуатації матеріалів повного життєвого циклу, максимально дружніх до довкілля, здійснюється мінімальний негативний вплив на навколишнє середовище. Після завершення експлуатації ці матеріали можуть бути повністю утилізовані [1]. Енергозбереження – один з основних критеріїв, що визначає

вид та матеріал для стінових огорожувальних і несучих виробів та конструкцій. Багаторічний зарубіжний [2–4] і вітчизняний [5, 6] досвід свідчить, що в умовах дефіциту фінансових і енергетичних ресурсів використання газобетонних виробів дозволяє швидко і ефективно вирішувати проблеми житлового будівництва. В кліматичних умовах України АГБ є практично єдиним стіновим матеріалом, що можливо застосовувати для влаштування одношарових огорожувальних конструкцій. Як відомо, вироби з автоклавного газобетону характеризуються досить хорошою міцністю, високою теплоізоляційної здатністю і суттєво впливають на енергозбереження, необхідне для обігріву об'єктів, забезпечуючи при цьому здоровий мікроклімат в приміщеннях. Цей сучасний високотехнологічний будівельний матеріал найкращим чином підходить для умов збалансованого розвитку, як в процесі виробництва, так і застосування [7].

Таким чином, в Україні розвиток виробництва і застосування в будівництві автоклавного газобетону є першочерговим завданням, спрямованим на забезпечення сталого розвитку нашої держави.

Встановлення більш жорстких вимог до теплоізоляції стін та здорожчання енергоносіїв в Україні обумовили основну тенденцію у виробництві АНБ – зниження густини стінових виробів зі збереженням міцнісних характеристик продукції.

Традиційними недоліками виробів зниженої густини є низький опір розтягуючим напруженням, підвищена крихкість, незначна міцність на розтяг при згині, знижена тріщиностійкість [7]. В результаті цього вироби можуть отримувати небажані сколи і тріщини як в процесі виготовлення, так і під час транспортування та монтажу. Неавтоклавні ніздрюваті бетони (більшою мірою ніж автоклавні) зазнають також усадкових деформацій, що призводить до порушення цілісності виробів.

Одним зі способів подолання вищезазначених недоліків є збільшення міцності та оптимізація структури шляхом використання високоактивних мінеральних та хімічних добавок. Не менш ефективним є застосування матеріалів та речовин, що здатні створити структурний зміцнюючий каркас ніздрюватобетонного масиву, тобто армувати міжпорові перегородки, міцність яких визначає міцність всього матеріалу.

Дисперсне армування ніздрюватого бетону мінеральними, полімерними або іншими неметалевими волокнами значно покращує міцнісні та деформаційні властивості матеріалу та підвищує надійність виробів і конструкцій при експлуатації.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. З метою підвищення конкурентоспроможності пористих бетонів в сучасних умовах актуальним завданням є подальше поліпшення фізико-технічних властивостей цих матеріалів і створення енергозберігаючих технологій їх виготовлення.

Одним із способів вирішення цього завдання на сучасному етапі розвитку бетонознавства є використання дисперсного армування, що поліпшує механічні та фізико-технічні властивості бетону – довговічність, міцність і експлуатаційні властивості.

Відповідно до [8] для широкого застосування фібрового армування у виробництві ніздрюватого бетону необхідно вирішити наступні питання:

- збереженість (стійкість і довговічність) кожного виду матеріалу фібр в цементних, вапняних, зольних та інших розчинах з різним ступенем лужності середовища;

- вплив фібрового армування на міцність ніздрюватого бетону при стисканні і розтягненні при короткочасному і тривалому впливі навантажень;

- вплив фібрового армування на модулі пружності і коефіцієнт поперечних деформацій;

- вплив фібрового армування на усадку бетону в процесі термовологісної обробки і протягом подальшого тривалого часу, а також на морозостійкість пористого бетону;

- вплив на зазначені вище властивості довжини фібрових волокон (оптимальної довжини волокон і їх оптимальної кількості – дозування);

- розробка розпушувачів і подрібнювачів волокон та змішувачів для введення фібрових волокон в ніздрюватобетонні суміші. Згідно з даними [9] розпушування волокон містить в собі потенційні можливості поліпшення властивостей ніздрюватого фібробетону, які можуть і повинні бути реалізовані саме в процесі приготування суміші.

В роботі [10] досліджено використання базальтових волокон як пружної арматури для бетонних елементів та використання подрібнених базальтових волокон як добавки для посилення механічних властивостей бетону. Відмічено, що дисперсне армування бетону базальтовою фіброю мало впливає на міцність бетону при стиску, але помітно збільшує значення міцності на розтяг при згині.

В результаті дисперсного армування відбувається покращення структурних характеристик вихідних матеріалів, що призводить до покращення експлуатаційних властивостей та підвищення довговічності виробів і конструкцій. Збільшення відношення границь міцності на розтяг та стиск R_{bt}/R_c , що досягається дисперсним армуванням, являє собою засіб підвищення ефективності бетону як конструкційного матеріалу [11, 12]. Інтегральні властивості фібробетону, як і будь-якого іншого композиту, обумовлюються властивостями його компонентів (фібри і бетону-матриці), а також наявністю та ступенем їхньої спільної роботи. В фібробетонах така робота забезпечується за рахунок зчеплення та анкерування фібри в бетоні [12].

Для дисперсного армування ніздрюватого бетону доцільно використовувати різну фібру: поліпропіленову, нейлонову, поліефірну

поліамідну, акрилову, поліетиленову, вуглецеву, целюлозну тощо. Вибір виду фібри залежить, насамперед, від технології виготовлення ніздрюватобетонних виробів.

Ряд зарубіжних та вітчизняних дослідників вивчали вплив дисперсного армування полімерними та скляними волокнами [13, 14], поліпропіленовою, базальтовою, скляною та вуглецевою фіброю [15, 16], фіброю на основі відходів переробки хвойних порід деревини [17, 18] тощо. Визначено, що додавання волокон дозволяє підвищити міцність на розрив, знизити ризик усадки, знизити крихкість ніздрюватого бетону та стабілізувати ніздрюватобетонну суміш.

Всі вищезгадані роботи висвітлюють дослідження механічних і теплоізоляційних властивостей та мікроструктури конструкційно-теплоізоляційних газобетонів автоклавного та неавтоклавного тверднення марок за середньою густиною D400, D500 і D600 та конструкційного пінобетону D1200. В роботах підтверджується позитивний вплив армування на міцність на стиск і на розтяг при згині та довговічність ніздрюватого бетону.

Однак не вирішеними лишаються не менш актуальні питання дисперсного армування теплоізоляційних АГБ середньою густиною менше 300 кг/м^3 . Крім того, застосування вищезгаданих видів фібри для армування автоклавного газосилікату вкрай обмежене, а для полімерних волокон – неможливе через їхню низьку термічну стійкість, оскільки температура автоклавної обробки досягає $200 \text{ }^\circ\text{C}$, що у сукупності з підвищеним тиском та високою лужністю середовища тверднучого автоклавного газобетону призводить до повного руйнування волокна. Це підтверджує робота [19].

В цілому, з проведеного аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки:

- на сьогодні дослідження щодо дисперсного армування автоклавного газобетону, в основному, зосереджені навколо конструкційно-теплоізоляційних бетонів з середньою густиною понад 350 кг/м^3 . Ці дослідження спрямовані на підвищення міцнісних характеристик АГБ та його довговічності. Сфера застосування отриманих дисперсноармованих конструкційно-теплоізоляційних АГБ – виробництво стінових блоків та великорозмірних огорожувальних конструкцій (плит покриття і перекриття, стінових панелей, перемичок тощо);

- застосування полімерної та скляної фібри для армування АГБ не дає очікуваного позитивного ефекту внаслідок низької термо- та лугостійкості волокон;

- перспективним є застосування деревинної фібри, вуглецевої та базальтової фібри, хоча останні дві більш придатні для армування газобетону, ніж для газосилікату.

Таким чином, для теплоізоляційного АГБ густиною (150–300) кг/м³ доцільним є проведення дослідження щодо можливості застосування для дисперсного армування коротких мінеральних волокон (мікрофібри). Це дасть додаткові можливості для підвищення його міцнісних характеристик, зниження крихкості та усадочних явищ. А також підвищення стабільності процесів приготування сумішей, спучування та тверднення масивів, і, як наслідок, підвищення якості готової продукції.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є теоретичне обґрунтування, розробка, дослідження та промислова апробація нового матеріалу – фіброгазобетону з високими експлуатаційними характеристиками та довговічністю, отриманого з застосуванням базальтової мікрофібри в якості дисперсної арматури.

Для досягнення поставленої мети на першому етапі досліджень необхідно вирішити наступні завдання:

- забезпечити корозійну стійкість фібри в середовищі бетону-матриці;
- вивчити вплив дисперсної арматури на процеси, що протікають в суміші в початковий період (висоту спучування та кінетику наростання пластичної міцності на ранній стадії тверднення);
- дослідити вплив фібри на характеристики міцності та густини отриманих АГБ.

Матеріали та методи дослідження. Для досліджень було використано базальтову мікрофібру «MAGMA MICROFIBER» виробництва ТОВ «Магма Індустрія» (м. Костопіль, Україна). Це нова армуюча мікрофібра, призначена для створення 3D-армованих композиційних матеріалів. Мікрофібра виготовляється на основі подрібненого механічним способом базальтового супертонкого волокна «MAGMAWOOL», виробленого з використанням індукційної плавки шихти при температурі близько 2200 °С, що дозволяє отримати повністю аморфну структуру волокна, яке має підвищену механічну міцність і гнучкість, більшу хімічну і теплову стійкість в порівнянні з волокнами з Е-скла. Насипна густина знаходиться в межах 1,5–2 г/см³.

Базальтова мікрофібра «MAGMA MICROFIBER-M» містить фрагменти волокон з довжиною 25 – 120 мкм і до 10–20 % дрібнодисперсних частинок неправильної форми з лінійними розмірами 0,1–0,5 мкм. Фракції «MAGMA MICROFIBER-25», «MAGMA MICROFIBER-50» і «MAGMA MICROFIBER-75» мають середню довжину мікрволокон 25, 50 і 75 мкм відповідно. Кількість дрібнодисперсної фракції 0,1–0,5 мкм в цих матеріалах менше приблизно в десять разів.

Мікрофібра «MAGMA MICROFIBER-Zr» на основі базальту, модифікованого силіцидом цирконію, відрізняється підвищеною хімічною стійкістю.

Хімічний склад і технічні характеристики базальтових супертонких волокон згідно з даними виробника наведено в табл. 1 і 2.

Таблиця 1

Хімічний склад базальтових супертонких волокон

SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	Na ₂ O	TiO ₂
51,56	15,49	10,43	4,42	8,5	5,22	0,2	2,1	2,08

Таблиця 2

Технічні характеристики базальтових супертонких волокон

Властивості	Параметр
Середній діаметр волокна, не більше	2 мкм
Масова частка неволокнистих включень «корольків»	до 4,8 %
Густина	от 30 до 125 кг/м ³
Коефіцієнт теплопровідності, не більше:	
при (25±5)°C	0,034 Вт/м·К
при (125±5)°C	0,054 Вт/м·К
при (300±5)°C	0,098 Вт/м·К
Коефіцієнт звукопоглинання, для частот від 100 до 2000 Гц	0,95 – 0,99
Температурний інтервал застосування	-269...+900 °C
Температура спікання волокон	+1100 °C
Гігроскопічність	0,2 – 0,3 %
Горючість	НГ (не горючий)
Модуль кислотності	4,8 – 5,2
Масова частка вологи, не більше	0,8 %
Масова частка парів хлору, не більше	0,03 %
Хімічна стійкість (втрата маси у % при 3-годинному кип'ятінні)	
у воді	0,6 %
в лужному середовищі	2,75 %
в кислотному середовищі	2,2 %
Вилугування в перерахунку на Na ₂ O на 5000 см ³ , не більше	5,0 %
Наявність зв'язуючого	немає
Виділення шкідливих речовин	немає

Мікрофібра марки «MAGMA MICROFIBER-Zr» виготовляється з суміші базальтової шихти Берестовецького родовища і порошку силікату цирконію виробництва «Didier Taylor Refractories Inc». У процесі плавлення середня температура на дзеркалі розплаву досягає 2450 °C, а в зоні випуску розплаву 2140 °C.

Аналіз мікрморфології зразків і кількісний мікроаналіз проводили з використанням растрового електронного мікроскопа Tesca Mira 3 LMU (Tescan, Чехія) та енергодисперсійного спектрометра Oxford Instruments X-Max 80 mm² SDD (Oxford Instruments, Великобританія). Хімічну стійкість визначали стандартним методом.

Діаметр волокон знаходиться в межах 0,3–3,4 мкм. Поверхня волокон досить гладка, без особливих вад і раковин, структура досить однорідна [20].

Результати аналізу мікрморфології зразків волокон, отриманих з стекол з різним вмістом концентрату цирконію у вихідній сировині та кількісного мікроаналізу з використанням растрового електронного мікроскопа наведено в табл. 3 [20].

Таблиця 3

Вибірковий мікрозондовий аналіз складу волокон «MAGMA MICROFIBER-Zr»

Спектр	C	O	Na	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Zr	Разом
Склад 1												
1	23.21	34.30	1.16	2.23	4.58	15.80	0.56	6.10	1.54	8.99	1.55	100.00
2	15.25	43.06	1.81	2.94	5.36	17.13	0.49	4.66	1.05	6.68	1.57	100.00
3	13.21	44.68	1.68	2.81	5.57	17.48	0.51	4.89	1.14	6.39	1.66	100.00
4	11.99	47.11	1.88	3.10	5.46	17.22	0.44	4.38	1.06	5.59	1.77	100.00
5	24.12	40.34	1.21	2.40	4.34	14.40	0.32	4.26	1.10	6.05	1.47	100.00
Склад 2												
1	7.55	38.69	1.67	2.17	4.39	18.88	0.50	4.85	1.48	6.85	12.95	100.00
2	7.00	41.12	1.77	2.34	5.04	20.27		4.35	0.95	3.92	13.25	100.00
3	5.62	45.51	1.62	2.55	4.56	18.06	0.37	3.85	0.80	4.49	12.56	100.00
4	6.06	43.27	1.68	2.43	4.80	18.49	0.46	3.58	1.12	5.11	12.99	100.00

Дані табл. 3 вказують на досить однорідний розподіл Zr як на поверхні, так і в усьому об'ємі волокон.

Результати досліджень стійкості волокон різних складів в агресивних середовищах (2N NaOH, 2N HCl, 0,5N NaOH, H₂O) вказують на високу хімічну стійкість отриманих волокон. Втрата маси після витримки у середовищі 2N NaOH становила до 20 % для фібри «MAGMA MICROFIBER-Zr» проти 80 % для рядової базальтової фібри; у середовищі 2N HCl 26 % проти 78 %, у середовищі 0,5N NaOH 64 % проти 92 % відповідно [20].

Дослідження поверхні волокон MAGMA MICROFIBER-Zr показали, що структура волокон після перебування в агресивних середовищах практично не змінилася, тріщин і раковин на поверхні волокон не спостерігалось. Цирконійвміщуючі волокна хімічно стійкіші і в лужному, і в кислому середовищах у порівнянні з базальтовими [20].

Для виготовлення зразків теплоізоляційного газобетону було використано наступні сировинні матеріали: портландцемент СЕМ І 52,5 N, вапняно-піщане в'язуче, молотий пісок, камінь гіпсовий, модифікуючі добавки. Як газоутворювач використано алюмінієву пудру.

Витрата в'язучих, кремнеземистого компонента, газоутворювачів і модифікуючих добавок – відповідно до прийнятої рецептури ТОВ «АЕРОК». Вміст

мікрофібри складав 0,1%, 0,2% і 0,3% від маси сухих компонентів сировинної суміші. Мікрофібру вводили в суміш разом з кремнеземистим компонентом.

Режими витримки та автоклавної обробки – згідно з прийнятою технологією ТОВ «АЕРОК».

Міцність та середню густину отриманих зразків фіброгазобетону визначали згідно з чинними нормативними документами на методи випробувань (ДСТУ Б В.2.7-170, ДСТУ Б В.2.7-214).

Для визначення міцності при стиску та середньої густини з готових виробів випилювали зразки-куби розміром 100x100x100 мм. Міцність на розтяг при вигині визначали на зразках-балочках 40x40x160 мм.

Дослідження міцнісних характеристик теплоізоляційного фіброгазобетону. Фахівцями ДП «НДІБМВ» (Україна) за підтримки ТОВ «АЕРОК» (Україна) проведено пошукові дослідження для визначення можливості застосування фібри з базальтового супертонкого волокна при виробництві теплоізоляційного автоклавного газобетону середньою густиною 150 кг/м³.

Було виготовлено зразки теплоізоляційного автоклавного газобетону марки за середньою густиною D150 контрольного складу та армовані базальтовою мікрофіброю марок «MAGMA MICROFIBER-M», «MAGMA MICROFIBER-25», «MAGMA MICROFIBER-50», «MAGMA MICROFIBER-75» і «MAGMA MICROFIBER-Zr».

Ніздрюватобетонні суміші, що містили фібру у кількості 0,1 – 0,2% характеризувались стабільністю кінетики спучування. Після завершення процесу спучування висота масивів, що містили фібру у кількості 0,3% була дещо меншою, ніж у масивів, що містили фібру у кількості 0,1 – 0,2%. Спучування масивів завершувалось в період від 50 хв. до 55 хв.

Пластичну міцність ніздрюватобетонного сирцю визначали за допомогою прецензійного конічного пластометру з цифровою індикацією глибини ідентифікування при двох параметрах – максимальній глибині занурення конуса та глибині занурення конуса в момент максимальної швидкості занурення.

Контрольні зразки характеризувались пластичною міцністю 0,12 МПа; час набору пластичної міцності складав 4 год. 05 хв. Склади, армовані фіброю «MAGMA MICROFIBER-M» набрали пластичну міцність від 0,122 МПа до 0,136 МПа в середньому за 3 год. 50 хв. Армовані «MAGMA MICROFIBER-25» – від 0,128 МПа до 0,14 МПа за 3 год. 42 хв.; «MAGMA MICROFIBER-50» – від 0,131 МПа до 0,14 МПа за 3 год. 45 хв.; «MAGMA MICROFIBER-75» – від 0,13 МПа до 0,142 МПа за 3 год. 40 хв., «MAGMA MICROFIBER-Zr» – від 0,138 МПа до 0,147 МПа за 3,5 години відповідно.

Результати визначення фізико-механічних характеристик отриманих зразків автоклавного газобетону наведено у табл.4.

Результати, наведені у табл.4 свідчать про підвищення порівняно з

контрольними зразками показників міцності при стиску та на розтяг при згині отриманих АГБ, армованих базальтовою фіброю. Найвищу міцність показали зразки, армовані фіброю «MAGMA MICROFIBER-Zr». При цьому значення середньої густини армованих АГБ (153,6–155,5) кг/м³ знаходяться на рівні бетону контрольного складу (154,7 кг/м³).

Таблиця 4

Фізико-механічні характеристики зразків автоклавного газобетону

Зразок	Середня густина в сухому стані, кг/м ³	Міцність при стиску, МПа	Міцність на розтяг при вигині, МПа
1	2	3	4
Контрольний	154,7	0,371	0,104
Армований мікрофіброю при вмісті фібри, % від маси сухих компонентів:			
«MAGMA MICROFIBER-M»			
0,1	153,9	0,394	0,105
0,2	154,4	0,398	0,108
0,3	154,8	0,401	0,110
«MAGMA MICROFIBER-25»			
0,1	155,0	0,396	0,107
0,2	155,3	0,407	0,112
0,3	154,6	0,415	0,116
«MAGMA MICROFIBER-50»			
0,1	153,5	0,399	0,107
0,2	154,2	0,412	0,118
0,3	155,0	0,417	0,121
«MAGMA MICROFIBER-75»			
0,1	155,0	0,407	0,108
0,2	155,2	0,415	0,119
0,3	155,5	0,420	0,126
«MAGMA MICROFIBER-Zr»			
0,1	153,6	0,413	0,111
0,2	154,1	0,419	0,120
0,3	154,8	0,425	0,128

Висновки

1. Встановлено, що ведення до складу ніздрюватобетонної суміші базальтової мікрофібри позитивно впливає на величину та швидкість наростання пластичної міцності сирцю. Так, контрольні зразки за 4 год. набирають пластичну міцність 0,12 МПа. Зразки, армовані мікрофіброю характеризувались пластичною міцністю від 0,122 МПа до 0,147 МПа, при цьому час набору міцності становив від 3,5 годин до 3 год. 50 хв.

2. Використані в дослідженні зразки мікрофібри однаково впливають на висоту случування ніздрюватобетонних масивів. Найбільшою відносною

висотою спучування $h/h_{\max}=1,08$ характеризувались масиви, що містили 0,1 % мікрофібри «MAGMA MICROFIBER-Zr» від маси сухих компонентів. Найменшу відносну висоту спучування $h/h_{\max}=0,87$ мали масиви, що містили 0,3 % мікрофібри «MAGMA MICROFIBER-75».

3. Дисперсне армування теплоізоляційного АГБ позитивно впливає на характеристики міцності при стиску та на розтяг при згині. Міцність при стиску дисперсноармованих АГБ зростає від 0,394 МПа до 0,425 МПа проти 0,371 МПа контрольних зразків, міцність на розтяг при згині від 0,105 МПа до 0,128 МПа проти 0,104 МПа відповідно. При цьому значення середньої густини у сухому стані залишаються практично на одному рівні: 154–155 МПа для армованого і неармованого АГБ.

1. Kreft O. Circular economy potential for autoclave aerated concrete. *ce papers*. 2018;2:465-470. <http://doi.org/10.1002/cepa.893>
2. Paleri M, Miliani A. The sustainability of wall solutions: Life Cycle Assessment (LCA) of different solutions for external closures. *ce papers*. 2018;2:489–494. <https://doi.org/10.1002/cepa.879>
3. Nearly Zero Energy Buildings built with AAC / Jos Cox// <https://www.eaaca.org/index.php/news/175-nearly-zero-energy-buildings-built-with-aac>
4. Брынзин Е.В., Парута В.А. Реализация концепции «устойчивого развития» в Украине путем использования автоклавного газобетона /Брынзин Е.В., Парута В.А.// <https://gazobeton.org/uk/node/45>
Bry`nzin E.V., Paruta V.A. Realizaciya koncepczii «ustojchivogo razvitiya» v Ukraine putem ispol`zovaniya avtoklavnoho gazobetona /Bry`nzin E.V., Paruta V.A.
5. Буравченко С.Г. Преимущества использования автоклавного газобетона при строительстве однослойных несущих стен 3-5 этажных домов / <https://gazobeton.org/uk/node/38>
Buravchenko S.G. Preimushhestva ispol`zovaniya avtoklavnoho gazobetona pri stroitel`stve odnoslojny`kh nesushhikh sten 3-5 e`tazhny`kh domov
6. Krivenko P, Kovalchuk G and Kovalchuk O (2005). Heat-resistant cellular concretes based on alkaline cements. Proceedings of the International Conference on the Use of Foamed Concrete in Construction. 97-104.
7. Zapotoczna-Sytek G., Balkovic S.: Autoklawizowany beton komórkowy. Technologia – Właściwości – Zastosowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Stowarzyszenie Producentów Betonu, Warszawa 2013.
8. Pucharenko Ju .Structural Model and Strength Predicting of Fiber-Reinforced Concrete / Pucharenko Ju ., Morozov V. // World Applied Sciences Journal, 23 (Problems of Architecture and Construction), 2013. pp: 111-116.
9. О некоторых свойствах фибропенобетона неавтоклавного твердения и изделий из него. /Моргун Л.В.// Строительные материалы, оборудование и технологии XXI века. №2 (73). 2005. С.24-26
O nekotory`kh svojstvakh fibropenobetona neavtoklavnoho tverdeniya i izdeliy iz nego. /Morgun L.V.// Stroitel`ny`e materialy`, oborudovanie i tekhnologii KhKhH` veka. #2 (73). 2005. S.24-26
10. Use of basalt fibers for concrete structures /Cory High, Hatem M. Seliem, Adel El-Safty, Sami H. Rizkalla // Construction and Building Materials, Volume 96, 15 October 2015, Pages 37-46

- 11.** Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона / Рабинович Ф.Н., Баев С.М. // Промышленное и гражданское строительство. —2009. — №8 — С.28-31
 E`ffektivnost` primeneniya polimerny`kh fibr dlya dispersnogo arirovaniya betona / Rabinovich F.N., Baev S.M. // Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo. —2009. — #8 — S.28-31
- 12.** Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона / Рабинович Ф.Н., Баев С.М. // Промышленное и гражданское строительство. —2009. — №9 — С.38-41
 E`ffektivnost` primeneniya polimerny`kh fibr dlya dispersnogo arirovaniya betona / Rabinovich F.N., Baev S.M. // Promy`shlennoe i grazhdanskoe stroitel`stvo. —2009. — #9 — S.38-41
- 13.** Durability Properties of High Performance Foamed Concrete / Eva Namsone, Genadijs Šahmenko, Aleksandrs Korjajins// Procedia Engineering, Volume 172, 2017, Pages 760-767
- 14.** Research into structure formation and properties of the fiberreinforced aerated concrete obtained by the nonautoclaved hardening / Andriy Melnyk, Serhii Braichenko, Igor Zavadsky, Myroslav Sanytsky, Oksana Poznyak //Восточно-Европейский журнал передовых технологий; 2018; 3 (6 (93)): 39-46; DOI: 10.15587/1729-4061.2018.133594.
- 15.** Mechanical and microstructural features of autoclaved aerated concrete reinforced with autoclaved polypropylene, carbon, basalt and glass fiber/ Zühtü OnurPehlivanli, İbrahimUzunb, İlhami Demir//Construction and Building Materials, Volume 96, 15 October 2015, Pages 428-433
- 16.** The effect of different fiber reinforcement on the thermal and mechanical properties of autoclaved aerated concrete / Zühtü Onur Pehlivanli, İbrahim Uzun, Zeynep Pınar Yücel, İlhami Demir// Construction and Building Materials, Volume 112, 1 June 2016, Pages 325-330
- 17.** Utilizing wood fiber produced with wood waste to reinforce autoclaved aerated concrete / Rongsheng Xu, Tingshu He, Yongqi Da, Yang Liu, Chang Chen// Construction and Building Materials, Volume 208, 30 May 2019, Pages 242-249
- 18.** Experimental study of high-performance autoclaved aerated concrete produced with recycled wood fibre and rubber powder /Tingshu He, Rongsheng Xu, Yongqi Da, Renhe Yang, Yang Liu//Journal of Cleaner Production, Volume 234, 10 October 2019, Pages 559-567
- 19.** A discussion of “Influence of fibrous additives on properties of aerated autoclaved concrete forming mixtures and strength characteristics of products” by A. Laukaitis, J. Kerienė et al. [Construction and Building Materials 23 (9) (2009) 3034–3042] /Min Li //Construction and Building Materials, Volume 25, Issue 4, April 2011, Pages 2169-2170
- 20.** Цирконийсодержащие волокна на основе горных пород базальтоподобного состава Ю.Н. Чувашов, Г.Ф. Горбачев, О.М. Яценко, Е.И. Зубко, Ю.Е. Зубко, А.А. Фомичев, С.Д. Черюканов, Н.А. Скорик // Техника и технология производства теплоизоляционных материалов из минерального сырья: Доклады XI Всероссийской научно-практической конференции 6 – 8 июня 2012.–Бийск: БТИ АлтГТУ, 2012.– С. 14–17.
 Czirkonijisoderzhashhie volokna na osnove gomny`kh porod bazal`topodobnogo sostava Yu.N. Chuvashov, G.F. Gorbachev, O.M. Yashhenko, E.I. Zubko, Yu.E. Zubko, A.A. Fomichev, S.D. Cheryukanov, N.A. Skorik // Tekhnika i tekhnologiya proizvodstva teploizolyacii`kh materialov iz mineral`nogo sy`r`ya: Doklady` KhI Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferenczii 6 – 8 iyunya 2012.–Bijsk: BTI AltGTU, 2012.– S. 14–17.

ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНІ СУМІШІ НА ОСНОВІ РЕАКЦІЙНО-ПОРОШКОВИХ БЕТОНІВ

WATERPROOFING MIXTURES BASED ON REACTIVE-POWDER CONCRETE

Марчук В.В., к.т.н., ст. викладач, Дворкін Л.Й., д.т.н., проф., Марчук Б.В., магістрант, (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Marchuk V.V., candidate of technical sciences, Senior Lecturer, Dvorkin L.J., doctor of technical sciences, professor., Marchuk B.V., graduate student, (National University of Water Management and Nature Resources, Rivne)

Наведені результати експериментальних досліджень гідроізоляційних розчинів та сухих будівельних сумішей на основі реакційно-порошкових бетонів. Показана можливість отримання таких розчинів. Наведені і проаналізовані експериментально-статистичні моделі технологічних та фізико-механічних властивостей розчинових сумішей та розчинів, показано шляхи їх покращення.

In this study, the results of experimental research on masonry mortars based on dry mixtures with the use of reactive-powder concrete are given and shown the possibility of their industrial production.

In this study, the results of experimental research on WATERPROOFING mortars based on dry mixtures with the use of reactive-powder concrete are given and shown the possibility of their industrial production.

Powder-reactive concrete can serve not only as the main structural material in the construction of buildings and structures, but also as a semi-finished product for obtaining dry mortar for building mortars for various purposes.

The need for repair and protection of concrete structures is determined by the operating conditions and concrete service life. Such protection consists in the formation of a water-impermeable layer on the surface of the insulating material (outer layer) and with the filling of surface cracks, pores and capillaries with hydration products. Surface treatment of the structure allows to increase their density, strength, watertightness, and hence the service life.

The possibility of obtaining waterproofing mortar based on dry mixes, where reaction powder concrete was used as a semi-finished product, was experimentally substantiated. When adjusting the composition of BPM

additives, you can get repair mixtures with high strength, deformative and adhesive properties.

The influence of composition factors on the properties of mortar mixtures and solutions is investigated. It was found that the introduction of a polymeric additive based on vinyl ester of versatic acid (Neolith P4400) with an additional adjustment of the ash and sand content allows to obtain mixtures for waterproofing solutions with a water resistance grade of up to W10

Ключові слова: Реакційно-порошковий бетон, будівельний розчин, міцність, суперпластифікатор, гідроізоляція.

Reactive-powder concrete, mortar, strength superplasticizer, waterproofing.

Вступ. Сухі будівельні суміші (СБС) стають все більш актуальними в будівництві завдяки ряду переваг у порівнянні із товарними розчиновими сумішами. В багатьох випадках, стає неефективною експлуатація великих заводів з виробництва товарних розчинових сумішей внаслідок підвищення транспортних витрат. Використання СБС сприяє підвищенню продуктивності праці і якості робіт, зниженню витрат на транспортування і зберігання, скороченню технологічних операцій. Можливість управління основними властивостями СБС шляхом зміни вмісту різних компонентів і інших модифікаторів, створює широкий асортимент необхідних для зведення споруд матеріалів і тим самим дозволяє використовувати їх при виконанні всіх видів робіт.

Стан питання та задачі дослідження. Термін служби бетонних і залізобетонних конструкцій визначається умовами експлуатації і в багатьох випадках залежить від їх гідроізоляції, просочування води відбувається через пори. Пористість є невід'ємною складовою цементної матриці. Так, при В/Ц = 0,5 об'єм пор розмірами від 1 нм до 1мм становить 46% об'єму цементного каменю. Чим вище В/Ц, тим в більшій кількості утворюються пори [1 ... 4].

Важливим для забезпечення гідроізоляційних властивостей є вибір цементів, які повинні містити мінімум компонентів, які при гідратації і його твердінні перетворюються в водорозчинні сполуки. Вирішальну роль для досягнення високих характеристик, що притаманні гідроізоляційним сумішам, відіграють інертні наповнювачі. Важливий не тільки мінералогічний і фракційний склад, а й конфігурація частинок наповнювачів, а також відсутність в них капілярних пор. Заповнювачі і наповнювачі не повинні містити водорозчинних компонентів [1, 5]. Їх наявність підвищує гідрофільність розчину, веде до росту В/Ц. При виборі наповнювачів рекомендується перевіряти їх водопоглинання і розчинність в нейтральному і лужному середовищі. Інертні наповнювачі не повинні містити компонентів, що змінюються в об'ємі при контакті з водою. Винятком є кольматційні гідроізоляційні суміші. Ситові характеристики інертних наповнювачів повинні забезпечувати максимально щільну упаковку.

Мета роботи результати якої наведені в даній статті полягала у підтвердженні доцільності використання РПБ у гідроізоляційних будівельних розчинах, а також дослідженні впливу факторів складу на їх властивості.

В якості вихідних матеріалів для отримання СБС були використані:

- РПБ, що містив: ПЦ-I-500 у кількості - 35%, виробництва “Волиньцемент” філія ПАТ "ДЦУ", мінералогічний склад клінкеру наступний: С₃S – 57,1%, С₂S – 21,27%, С₃A – 6,87%, С₄AF – 12,19%; золу-виносу Бурштинської ТЕС - 15%; пісок фр.0,16...0,63 – 50 %, суперпластифікатор 0,5% від цем.;
- кварцовий пісок фракції 0,16...1,25, Славутського кар’єру (Хмельницька обл.) з модулем крупності Мкр - 1,6...1,9;
- редиспергований полімерний порошок (РПП) Neolith P 4400 (вініловий ефір версатієвої кислоти) FAR SPA (Італія),

Методика досліджень та результати. Для вивчення впливу факторів складу гідроізоляційних сумішей на основі РПБ на їх властивості були виконані алгоритмізовані експерименти відповідно до трирівневого двохфакторного плану В₂ [6]. Умови планування експериментів наведені в табл. 1.

Таблиця 1.

Умови планування експериментів дослідження

Фактори впливу		Рівні варіювання			Інтервал
Натуральний вид	Кодований	-1	0	+1	
Частка РПБ, % по масі	X ₁	25	37,5	50	12,5
Вміст Neolith P 4400, % мас	X ₂	1	1,5	2	0,5

Як досліджувані параметри визначали водопоглинання, водонепроникність, міцність при стиску та згині розчинів. Границю міцності на розтяг при згині та стиск розчину у віці 1, 7 та 28 діб, які тверднули у повітряно-сухих умовах, а також водопоглинання визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-239. Водонепроникність визначали згідно з ДСТУ Б В.2.7-126:2011.

Матриця планування та склади гідроізоляційних сумішей, а також коефіцієнти рівнянь регресії наведено в табл. 2 та 3 відповідно.

Після статистичної обробки результатів експериментів, виконаних згідно плану були отримані коефіцієнти рівнянь регресії (табл. 3), які можна розглядати як характеристики впливу на якісні показники властивостей розчинів досліджуваних факторів в певному діапазоні їх варіювання.

Аналіз коефіцієнтів рівнянь регресії (табл. 3) показників властивостей гідроізоляційних розчинів дозволяє оцінити фактори за величиною ефекту їхнього впливу. На досліджувані властивості більш суттєвий вплив чинить вміст РПБ у порівнянні з добавкою полімерного порошку Neolith 4400 при збільшенні їх витраті в діапазоні варіювання. Згідно отриманих даних спостерігається суттєвий вплив ефектів взаємодії факторів. Очевидно, що

досягнення високих фізико-механічних показників розчинів можливе при відповідній оптимізації вмісту РПБ та РПП у їх складі

Таблиця 2.

Матриця планування та склади гідроізоляційних сумішей

№	Кодовані значення		Натуральні значення		Витрати матеріалів на 1т суміші			Вода замішування, л
	X ₁	X ₂	РПБ, %	РПП, %	РПБ, кг	РПП, кг	Пісок, кг	
1	1	1	50	2	500	20	480	140
2	1	-1	50	1	500	10	490	155
3	-1	1	25	2	250	20	730	150
4	-1	-1	25	1	250	10	740	175
5	1	0	50	1,5	500	15	485	150
6	-1	0	25	1,5	250	15	735	155
7	0	1	37,5	2	375	20	605	125
8	0	-1	37,5	1	375	10	615	140
9	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
10	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135
11	0	0	37,5	1,5	375	15	610	135

Таблиця 3.

Коефіцієнти рівнянь регресії

Коефіцієнти	Водопоглинання у віці 28 діб W ₀ , %	Міцність на згин, МПа, у віці			Міцність на стиск, МПа, у віці			Водонепроникність, у віці 28 діб W, МПа
		1 доби	7 діб	28 діб	1 доби	7 діб	28 діб	
B ₀	3,24	2,06	3,19	4,55	4,19	8,05	15,77	0,58
B ₁	-0,78	0,50	0,77	1,58	1,57	3,13	6,25	0,20
B ₂	-0,58	-0,42	0,42	0,44	-1,0	-2,38	-1,92	0,13
B ₁₁	-0,46	0,2	-0,38	-0,02	-0,06	0,39	-0,42	0,05
B ₂₂	0,04	0,14	0,27	0,03	-0,06	0,14	-0,42	0,05
B ₁₂	-0,1	-0,08	0,08	-0,22	-0,50	-0,93	-0,88	0,0

Таким чином, аналіз отриманих рівнянь регресії показує, що отримання гідроізоляційних сумішей на основі РПБ, що включає ПЦ, золу-виносу, суперпластифікатор та дрібний пісок, є ефективним технологічним прийомом, який дозволяє підвищити якісні характеристики гідроізоляційних розчинів. Для аналізу отриманих експериментально-статистичних моделей побудовані двофакторні графічні залежності, які відображають вплив факторів складу на властивості розчинів (рис. 1 та 2).

Про ступінь впливу факторів складу розчинів свідчать результати визначення параметрів водопоглинання (рис. 1 (а)). Водопоглинання розчину більш помітно

зменшується по мірі збільшення вмісту РПБ у суміші у порівнянні з РПП. Вміст порошкової бетонної суміші в межах 650...800 кг/т є достатнім для забезпечення досить низького водопоглинання при мінімальній та максимальній витраті полімерного порошку, яке становить 1,4...3,9% відповідно.

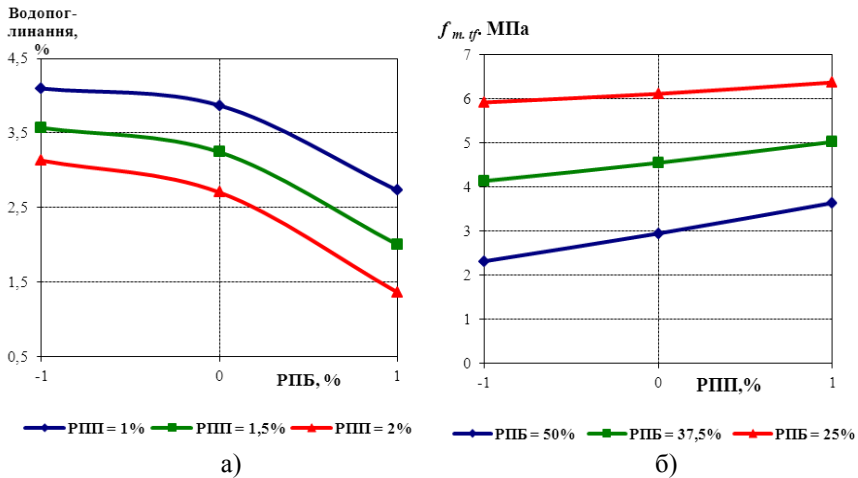


Рисунок 1 – Графічні залежності водопоглинання (а) та міцності при згині у віці 28 діб (б) гідроізоляційних розчинів на основі РПБ від факторів складу

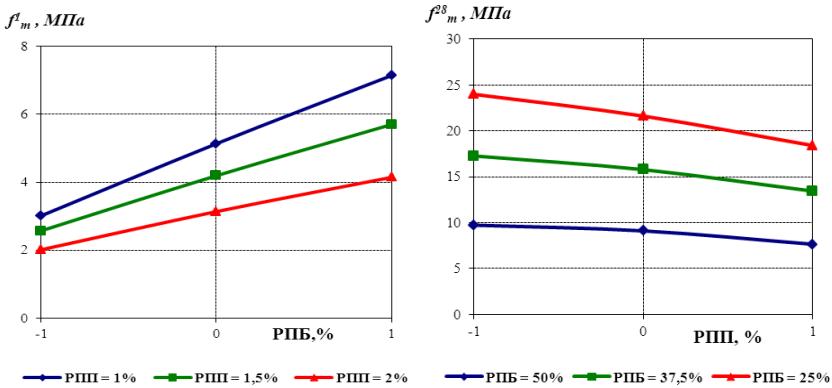


Рисунок 2 – Графічні залежності міцності при стиску у віці 1 доби (а) та 28 діб (б) гідроізоляційних розчинів на основі РПБ від факторів складу

З отриманих даних чітко видно негативний вплив на міцність розчинів, як при стиску так і при згині у віці 1 доби, збільшення вмісту добавки РПП (рис. 2, табл.3). Разом з тим, варто відмітити, що при підвищенні вмісту полімеру спостерігається позитивний ефект на міцність при згині у віці 28 діб. Ефект взаємодії факторів є негативним, хоча вплив його на величину міцності не дуже значний.

Вплив досліджуваних факторів на показник міцності є у певній мірі лінійним, про що свідчать незначимі квадратичні коефіцієнти рівнянь регресії. Особливо характерно це проявляється для міцності на згин у віці 28, діб на стиск в усі терміни твердіння. Збільшення кількості РПБ від 400 до 800 кг призводить до збільшення 1-о добової міцності на стиск в 1.8...2 рази, а 28-и добової в 2,4 рази. Для міцності при згині, приріст міцності, що зумовлений збільшенням витрати РПБ, менш вагомий 50...60% та 70...80% – відповідно при вмісті РПП 1% та 2%.

Як випливає з характеру взаємодії факторів підвищений вміст полімерної добавки більш позитивно впливає на міцність розчину на згин при меншій витраті РПБ.

Водонепроникність. Водонепроникність розчинів у вирішальній мірі залежить від особливостей його пористої структури. Якщо на міцність основний вплив має загальна пористість, то водонепроникність є функцією відкритої наскрізний пористості. Основними шляхами проникнення води в розчин є пори седиментаційного походження, утворення яких найбільш характерно для бетонів і розчинів з підвищеною рухомістю. Седиментація залежить головним чином від в'язкості цементного тіста, а основною седиментаційною характеристикою розчинової суміші є її водовідділення.

Зола-виносу робить істотний вплив на в'язкість пластифікованого цементного тіста і водовідділення бетонної суміші. За рахунок золи-виносу, що вводиться до складу РПБ зменшується кількість мікропор і має місце кольматація відкритих пор.

Основним чинником, що визначає величину водонепроникності – водоцементне відношення. Різке зменшення водонепроникності при В/Ц менше 0,25...0,4 може бути пояснено як зменшенням загальної пористості, так і перерозподілом співвідношення між різними типами пор.

Водонепроникність гідроізоляційних розчинових сумішей на основі РПБ у віці 28 діб за рахунок вибору оптимальних значень факторів та їх поєднань може досягати значення $W=0,6...1,0$ МПа.

Із збільшенням тривалості твердіння водонепроникність підвищується в результаті незворотної зміни структури порового простору і збільшення об'єму твердої фази в цементному камені. При цьому найбільше збільшення водонепроникності відзначено за інших рівних умов з вищими значеннями В/Ц і меншу з низькими значеннями В/Ц. З метою визначення впливу РПБ на проникність був визначений характер пористості зразків на основі золівмісних РПБ з різним вмістом РПП в їх складі. Було доведено, що введення РПП у кількості 1% незначно зменшує кількість відкритих капілярних пор. Із збільшенням вмісту Neolith P 4400 до 2% загальна кількість капілярних пор суттєво зменшується. Однак підвищений вміст РПБ (800кг/т) призводить до значного зменшення еквівалентного радіуса пор, що зумовлює зниження проникності затверділого розчину.

Особливості порової структури розчинів та низьке водопоглинання є визначальними для їх водонепроникності. В процесі твердіння розчинів утворюються полімерні плівки, що закривають мікропори і полімерні «містки», що з'єднують краї мікротріщин внутрішніх дефектів.

Гідроізоляційні суміші на основі РПБ характеризуються високими марками за водонепроникністю W6-W10, що дозволяє їх використовувати в різних конструкціях.

Висновки. Експериментально обґрунтована можливість отримання гідроізоляційних будівельних розчинів на основі сухих сумішей, де у якості напівфабрикату було використано реакційно-порошковий бетон. При коректуванні складу РПБ добавками можна отримати ремонтні суміші з підвищеними міцнісними, деформативними та адгезійними властивостями.

Досліджено вплив факторів складу на властивості розчинових сумішей та розчинів. Встановлено, що введення полімерної добавки на основі вінілового ефіру версатієвої кислоти (Neolith P4400) при додатковому коректуванні вмісту золи та піску дозволяє отримати суміші для гідроізоляційних розчинів з маркою по водонепроникності до W10.

1. Дворкін Л.Й. Основи бетонознавства. / Л.Й. Дворкін, О.Л. Дворкін // - К.: Основа, 2007. - 616 с..

Dvorkin L.I. Osnovy betonoznavstva. / L.I. Dvorkin, O.L. Dvorkin // - K.: Osnova, 2007. - 616 s..

2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика.–М. 1998.–768с.

Batrakov V.H. Modyfytsyrovannye betony. Teoryia y praktyka.–M. 1998.–768s.

3. Дворкін Л.Й. В'язучі речовини / Л.Й. Дворкін, Р.Ф. Рунова, О.Л. Дворкін, Ю.Д. Носовський // Київ, «Основа»,2012.-448 с.

Dvorkin L.I. Viazhuchi rechovyny / L.I. Dvorkin, R.F. Runova, O.L. Dvorkin, Yu.D. Nosovskiy // Kyiv, «Osnova»,2012.-448 s.

4. Дворкин Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями. / Л.И. Дворкин, В.И. Соломатов, В.Н. Выровой // – К.:Будівельник, 1991 – 136с.

Dvorkin L.I. Czementnye betony s mineralnymi napolnitelyami. / L.I. Dvorkin, V.I. Solomatov, V.N. Vyrovoy // – K.:Budi`vel`nik, 1991 – 136s.

5. Дворкін Л.Й. Сухие строительные смеси с применением дисперсных отходов промышленности. / Л.Й. Дворкін, В.В. Житковський, В.В. М. Марчук: Изд-во Инфра-Инженерия, 2019. 312 с.

Dvorki`n L.J. Sukhie stroitel`ny`e smesi s primeneniem dispersny`kh otkhodov promy`shlennosti. / L.J. Dvorki`n, V.V. Zhitkovs`kij, V.V. M. Marchuk: Izd-vo Infra-Inzheneriya, 2019. 312

6. Дворкін Л.Й. Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту / Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Житковський В.В. - Рівне: НУВГП, 2011- 174 с.

Dvorkin L.I. Rozv'язuvannia budivelno-tehnolohichnykh zadach metodamy matematychnoho planuvannia eksperymentu / Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Zhytkovskiy V.V. - Rivne: NUVHP, 2011- 174 s.

ФОРМУВАННЯ КОНТАКТНОЇ ЗОНИ «КЛАДКА-ШТУКАТУРНІ ПОКРИТТЯ»

THE FORMATION OF THE CONTACT ZONE "MASONRY-PLASTER COATING"

Парута В.А., к.т.н., доц., OrcidID: 0000-0003-0326-8021, **Лавренюк Л.І.**, к.т.н., доц., OrcidID: 0000-0001-8524-3105, **Гнип О.П.**, к.т.н., доц., OrcidID: 0000-0002-3797-7953, **Гриньова І.І.**, к.т.н., OrcidID: 0000-0001-7637-6029 (Одеська державна академія будівництва та архітектури)

Paruta V.A., PhD, Ass. Prof., **Lavrenyuk L.I.**, PhD, Ass. Prof., **Gnyup O.P.**, PhD, Ass. Prof., **Grynyova I.I.**, PhD (Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

У статті розглянуто механізм формування контактної зони «складних» (вапняно-цементних розчинів), показані причини утворення в ній дефектів і зниження адгезії до кладки, запропоновані шляхи вирішення проблеми: підвищення водоутримуючої здатності розчинної суміші. Для цього запропоновано ввести в розчинну суміш вапнякове борошно, ефіри целюлози, реліспергуємі полімерні порошки.

An analysis of existing wall structures with various decorative and protective systems (Masonry veneer with and without ventilated clearance, ceramic and rock tiles, hinged ventilated facade, “bonded thermal insulation” system, plastering etc.) is given in the article. The analysis showed that the optimal technical and economic solution is a single-layer wall made of autoclaved aerated concrete, with a plaster coating and a decorative layer (paint or varnish or decorative plaster).

The disadvantage of this design solution is that cracks form in the contact zone between the plaster coating and the masonry, during application and hardening. The plaster coating exfoliates from the masonry, which leads to an increase in the moisture content of the wall structure and heat loss through it, as well as a decrease in the period of its operation. The reason for reducing time of operation of the wall structure with a plaster coating, increasing heat loss through it, is the destruction of the coating and its contact zone with the masonry. The article discusses the mechanism of formation of the contact zone of "complex" (lime-cement mortars), shows the causes of the formation of defects in it and a decrease in adhesion to the masonry. It is noted that the main cause of defects in the contact zone of the coating with the masonry is

the suction of moisture from the mortar mixture, the base and its evaporation under the influence of the sun and wind. This leads to shrinkage of the plaster coating, the appearance of cracks and cavities between the coating and the masonry, a decrease in adhesive strength and peeling of the coating from the base.

To prevent violations of the contact zone of the article was proposed to increase the water retention capacity of the mortar. For this purpose, limestone flour, cellulose ethers, redispersible polymer powders were introduced into the mortar mixture.

The mechanism of the formation of the contact zone "masonry-polymer-cement plaster coating" is considered, and it is shown whereby the contact zone with a minimum number of defects and high adhesion to the base is obtained.

Ключові слова: стінова конструкція, штукатурні покриття, формування контактної зони «кладка-штукатурні покриття».

Wall construction, plaster coatings, formation of contact zone "masonry and plaster coatings".

Вступ. Міцність зчеплення штукатурного покриття з кладкою залежить від хімічної і фізичної взаємодії контактуючих матеріалів, а також від дії молекулярних, електростатичних і капілярних сил, спорідненості матеріалів, характеру і роду контакту [3, 4, 5, 6, 7].

Адгезійна міцність визначається кількістю контактів між штукатурним покриттям і кладкою, що припадає на одиницю поверхні, і міцністю окремого контакту (1).

$$P_c = N \cdot P_k \quad (1)$$

де N – кількість контактів, що припадає на одиницю поверхні між штукатурним покриттям і кладкою; P_k – міцність окремого контакту.

До тих пір поки нанесена розчинна суміш знаходиться у пластичному стані, зчеплення відбувається за рахунок присмокування порами матеріалу кладки, викликаного всмоктуючим тиском, а також від дії молекулярних і електростатичних сил. Надалі велику роль, грає механічне зчеплення розчину, що утворюється внаслідок склеювання плівками полімеру і впровадження в мікропори і макропори продуктів гідратації цементу, за рахунок яких, між кладкою і покриттям утворюються «заклепки», що зв'язують покриття і кладку механічним «заклинюванням» і хімічним взаємодією.

Гідросилікати, гідроалюмінати газобетонної кладки, являючись центрами кристалізації, забезпечують оптимальні умови твердіння полімерцементного розчину. Хімічна взаємодія контактуючих тіл, адсорбція молекул або їх груп на кордоні розділу фаз, дифузія молекул рідкої фази розчинної суміші у пори кладки матеріалу, сприяє зростанню площі контакту між кладкою і

штукатурним покриттям і посиленню адгезії. При цьому на кордоні розділу «кладка-штукатурка» утворюються впорядковано орієнтовані структури з мінімальною кількістю дефектів.

За рахунок цього відбувається збільшення площі контакту між покриттям і кладкою, а також виникнення адгезійного з'єднання, робота якого є добутком середньої енергії одиниці зв'язку на їх кількість, що припадає на одиницю поверхні адгезійного контакту (2).

$$W_A = W \cdot N \quad (2)$$

де: W – середня енергія одиниці зв'язку, що припадає на одиницю поверхні адгезійного контакту; N – кількість одиниць зв'язку.

Вона зумовлена молекулярною, хемосорбційною, електростатичною і дифузійною взаємодіями між атомами і молекулами, покриття та кладки, які призводять до утворення міжмолекулярних і хімічних зв'язків, а також залежить від характеру і щільності адгезійних зв'язків.

Важливим показником, що впливає на величину адгезії покриття до кладки, є площа фактичного контакту. Контактна зона являє собою багат шарову систему, що складається з продуктів гідратації цементу, пор і тріщин, негідратованих частинок цементу, заповнювача і наповнювача. Вона складається з контактної зони, що примикає безпосередньо до кладки і проміжного шару, перехідного до вапняно-цементно-піщаного розчину. Вони відрізняються між собою за щільністю, структурою і складом. Вона залежить від властивостей поверхні кладки (пористості, нерівності, деформації), розчинної суміші (водоутримуюча здатність), покриття (деформації) і процесів, що протікають при твердінні. Зменшення кількості дефектів у контактній зоні, між полімерцементним покриттям і кладкою, призводить до збільшення адгезійної міцності (3).

$$A_p = f(S, n, V) \quad (3)$$

де: S – фактична площа контакту; V_i – енергія одного адгезійного зв'язку; n – кількість зв'язків на одиницю поверхні (1).

При використанні так званих «складних» штукатурних розчинів (вапняно-цементних), система «кладка-штукатурне покриття» руйнується за двома основними схемами. Створення й розвиток тріщин у самому покритті і контактній зоні його з кладкою, викликані фізико-хімічними процесами, що протікають при його твердінні, під впливом зовнішнього середовища (агресивних газів і рідин) і силовими впливами на стінову конструкцію.

Аналіз існуючих стінових конструкцій з різними декоративно-захисними системами (облицювання цеглою з вентиляльованим зазором і без нього, керамічною плиткою та плиткою з гірських порід, навісний вентиляований фасад, система «скріпленої теплоізоляції», оштукатурювання і ін.) Показали, що оптимальним техніко-економічним рішенням є одношарова стіна з автоклавного газобетону, з штукатурним покриттям і декоративним шаром (лакофарбовий або декоративна штукатурка).

Недоліком такого конструктивного рішення є те, що при нанесенні і твердінні у штукатурному покритті та у зоні контакту з кладкою, утворюються тріщини. Штукатурне покриття відшаровується від кладки, що призводить до збільшення вологості у стінових конструкціях та тепловтрат через неї, зменшення періоду її експлуатації.

Причинами утворення тріщин є деформація споруди через його осад і інтенсивний вуличний рух, дефекти будівлі і кладки, неправильний вибір матеріалу і підбір складу розчинної суміші, порушення технології її приготування та нанесення [15], несприятливе співвідношення навантажень, напруг, міцнісних властивостей покриття та його зони контакту з кладкою.

Постановка мети і задач досліджень. Руїнування системи починається з моменту нанесення штукатурного покриття на кладку, і має три стадії: зародження дефектів і мікротріщин, їх розвиток та відшарування покриття від кладки. Ефективна довговічність стінової конструкції, тобто період часу протягом, якого конструкція виконує свої функції є сума часу від зародження, до відшарування та руїнування (4).

$$N_d \square N_{zt} \square N_{pt} \square N_{vt} \quad (4)$$

де: N_{zt} – час зародження тріщин; N_{pt} – час їх розвитку; N_{vt} – час відшарування штукатурного покриття від кладки і його руїнування;

Руїнування штукатурного розчину, його контактної зони з основою, пов'язане з утворенням, накопиченням і розвитком дефектів (мікро- і макротріщин) в структурі матеріалу та у контактній зоні. Знання цих процесів дозволить запобігти або уповільнити їх перебіг. Тому необхідно розглянути, зокрема, процес формування контактної зони «кладка - покриття».

Аналіз останніх досліджень. Процеси утворення тріщин у штукатурному розчині і контактній зоні, починаються після нанесення розчину на основу (кладку) та початку її твердіння. При змішуванні твердих компонентів розчинної суміші з водою, утворюється термодинамічно нестабільна композиція (П.А. Ребіндер, М.Б. Ур'єв, В.М. Вировой), структуроутворення якої відбувається у результаті фізико-механічних і фізико-хімічних процесів взаємодії дисперсних частинок між собою та дисперсним середовищем, при значному впливі доквілля. Вона являє собою коагуляційну структуру, в якій вода має вигляд міжчасткових прошарків [8].

Стіновий матеріал, наприклад пористий бетон, володіє високим капілярним потенціалом, через розвинену мікропористу структуру (з об'ємом пор $520 \text{ мм}^3 / \text{г}$) і високою питомою поверхнею пор ($22\text{-}34 \text{ м}^2 / \text{г}$). [9,10,11]. Через це, при нанесенні штукатурної суміші на кладку, відбувається відсмоктування вологи з розчинної суміші порами матеріалу основи (рис. 1а).

Штукатурне покриття має значний модуль відкритої поверхні (5), тобто відношення відкритої поверхні до об'єму розчину, тому при твердінні швидко

втрачає воду через випаровування під впливом сонячних променів і повітряних потоків (рис.1б).

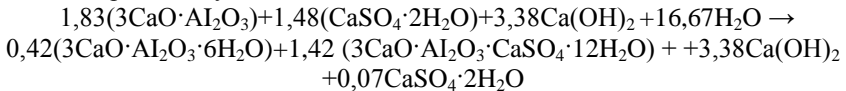
$$M = F/V \quad (5)$$

де: F – площа поверхні штукатурного покриття, відкрита для випаровування вологи, м²; V – об'єм поверхні штукатурного покриття, м³.



Рис.1 Відсмоктування кладкою і випаровування вологи з тверднучого розчину

Через втрату води, розчинення зерен цементу і освіту перенасиченого розчину відбувається при зниженому її змісті, що призводить до утворення нерівноважних, метастабільних полікристалічних новоутворень кристалогідратів типу:



У результаті цих процесів відбувається усадка штукатурного покриття (пластична, гідратаційна, гідравлічна) [13].

Пластична усадка починається після нанесення розчину на кладку і триває до початку схоплювання цементу. Протягом цього періоду вода, ще хімічно не пов'язана з мінералами цементу, відбирається основою або випаровується з відкритої поверхні. Величина пластичної усадки залежить від складу суміші розчину, властивостей використовуваних матеріалів і зовнішніх умов, опираючись на дослідження А.Е. Шейкіна [14] в період схоплювання усадка пропорційна втраті вільної води.

Гідратаційна усадка викликається тим, що обсяг утворених гідратів цементного тіста менше обсягу безводних речовин і води. Цей вид усадки відбувається в період інтенсивного протікання хімічних реакцій між цементом і водою, приводячи до утворення пор та дефектів у матеріалі.

Гідравлічна або вологісна усадка, проявляється після схоплювання штукатурного розчину і викликається випаровуванням вологи, її перерозподілом у матеріалі. Вона проявляється повільніше, ніж пластична, а її величина значно менше. Усадка залежить від тривалості та умов витримання штукатурного покриття, виду складових, їх витрат та гранулометрії заповнювачів і наповнювачів.

Повна гідратаційна усадка цементних розчинів становить 0,3 ... 0,8 мм, пластична усадка може перевищувати гідратаційну в 5-10 разів і становитиме 2 ... 5 мм / м. Максимальні усадочні деформації спостерігаються в період 6-10 годин після замішування суміші водою [13].

Після затвердіння штукатурного розчину, усадка триває через висихання штукатурного розчину викликаючи напруги в штукатурному покритті та у зоні контакту з кладкою. При відносній вологості повітря 60-90% переважає усадка, пов'язана з випаровуванням води з капілярів. При вологості менше 60%, видаляється адсорбційно зв'язана вода з гелю цементного каменю [13, 14]. При відносній вологості менше 20% переважає ефект поверхневого стиснення твердої фази через вилучення адсорбованої води і втрати міжшарової води С-S-H гелем. Причиною усадки є також стиснення шаруватих кристалів CSH, при висиханні, через скороченням довжини міжшарових зв'язків O-Ca-O внаслідок десорбції молекул води з міжшарових катіонів Ca²⁺, а також доглядом міжшарової, поверхневої і міжкристалічної води з мікропор (<15Å) і води з капілярів (15 Å > r <1000Å) [13,14].

Ці процеси впливають на формування контактної зони і міцність з'єднання «кладка - покриття». Відбувається утворення дефектів, що призводить до зменшення числа зв'язків, що припадають на одиницю площі контакту кладки і покриття, зниження адгезійної міцності. До них належать неповне заповнення розчину заглиблень і пор матеріалу кладки, утворення тріщин, пор, порожнин (рис. 2).



Рис.2 Утворення тріщин в контактній зоні «кладка - штукатурне покриття»

Методика та результати досліджень. Як ми вже відзначали однією з основних причин формування дефектної контактної зони «кладка-штукатурні покриття», зі штукатурними розчинами, є зневоднення суміші через відсмоктування вологи основою та її випаровування під впливом вітру і сонячних променів. Попереднє зволоження або ґрунтування кладки неефективне, так як це не запобігає випаровуванню вологи з суміші під впливом сонця і вітру. Для вирішення проблеми, розчинна суміш повинна мати високу водоутримуючу здатність. Це можна забезпечити введенням вапнякового борошна, ефірів целюлози і редиспергуємих полімерних порошоків. У цьому випадку всмоктувальний тиск (ΔP) буде «присмоктувати»

розчинну суміш до кладки, забезпечуючи формування контактної зони з мінімальною кількістю дефектів.

Величину всмоктуючого тиску (ΔP) знаходимо з рівняння Пуазейля (6).

$$\frac{d\ell}{d\tau} = (r^2 \Delta P) / 8\eta\ell \quad (6)$$

де r – радіус капіляра, м; ΔP – всмоктувальний тиск капіляра, Па; η – динамічна в'язкість рідкого реагенту розчинної суміші, Па·с; ℓ – глибина проникнення рідкого реагенту розчинної суміші, м; τ – час, с.

Проникнення рідкого реагенту (7) розчинної суміші у пори матеріалу кладки, також відбувається, але його значно менше, і залежить від балансу енергії на межі поділу фаз.

$$\sigma_m = 2\sigma_m - \frac{\rho \cos \theta}{2} \quad (7)$$

де σ_m – поверхневий натяг матеріалу кладки, кДж / м²; σ_{m-p} – поверхнева енергія на межі поділу фаз рідкого реагенту розчинної суміші за мінусом матеріалу кладки, кДж / м²; θ – крайовий кут змочування, °.

При співвідношенні $\sigma_m / \sigma_{m-p} \geq 2$ або $\theta = 0^\circ$ рідина, що міститься у суміші розчину проникає у пори та капіляри матеріалу кладки, тоді як при $\sigma_m / \sigma_{m-p} < 1$, а $\theta > 120^\circ$, проникнення не відбуватиметься.

Тоді значення всмоктуючого тиску пори (ΔP) отримуємо з рівнянь (8-11)

$$\Delta P = 2\sigma_p \cos \theta / r \quad (8)$$

де σ_p – поверхневий натяг рідкого реагенту розчинної суміші і штукатурного розчину; кДж / м².

Перетворивши рівняння, визначимо глибину проникнення рідкої фази (ℓ) і її кількість (D) за допомогою рівняння Ейнштейна (9)

$$\frac{d\ell}{d\tau} = r \sigma_p \cos \theta / 4\eta\ell \quad (9)$$

Об'єднавши і перетворивши обидві сторони рівняння (9) отримуємо:

$$\ell^2 = \left(\frac{r \cos \theta}{2} \right) (\sigma_p / \eta) \tau \quad (10)$$

$$D = \frac{kT}{6\pi\eta r} \quad (11)$$

де D – кількість рідкого реагенту розчинної суміші, м² / с; r – радіус частинок дифундуючої речовини, м.

Тоді максимальний капілярний тиск (ΔP_m) складе:

$$\Delta P_m = 2 \gamma_{LV} / r \quad (12)$$

де γ_{LV} – поверхневий (міжфазний) натяг; r – радіус кривизни поверхні розділу фаз. Потужність змінюється залежно від радіуса капіляра R : ΔP_m максимально при $R = r$.

Таким чином дрібні пори матеріалу кладки заповнюються рідиною що містить полімерні частки, іони кальцію, алюмінатні та кремнійкислородні аніони, а великі пори-осередки, розчинною сумішшю. У результаті того, що при «присмоктванні» штукатурного покриття до кладки, забезпечується максимальний контакт покриття з кладкою і додаються фізико-хімічні

процеси їх взаємодії, відбувається формування контактної зони з мінімальною кількістю дефектів (рис.3).

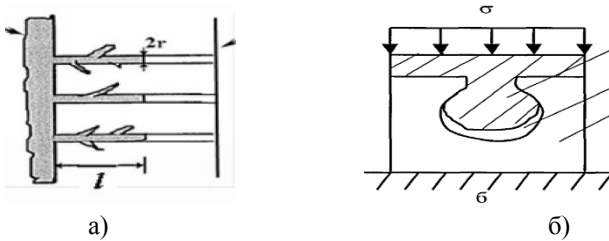


Рис.3. Формування контактної зони: а - проникнення рідини у дрібні пори; б - проникнення полімер-цементного розчину в великі пори.

Висновок. У результаті цілеспрямованого введення в розчинну суміш вапнякового борошна, ефірів целюлози, редиспергуємних полімерних порошоків, які використовують всмоктувальний тиск капілярів пор основи, забезпечується максимальний присмоктувальний ефект та формування якісної контактної зони, що в свою чергу підвищує рівень адгезії кладки і підвищення довговічності конструкції.

1. Басин В.Е. Адгезионная прочность. – М.: Химия, 1981. – 208 с.
2. Яковлев А.Д. Химия и технология лакокрасочных покрытий. – Л.: Химия, 1989. – 384 с.
3. Пищева Т.И. Оптимизация реологических и эксплуатационных свойств специальных штукатурных растворов из сухих смесей Специальность 05.23.05-Строительные материалы и изделия Дисс. На соиск. Степен. Канд.техн. наук. Одесса, ОГАСА, 2002, 176с.
4. Шульце В., Тишер В., Эёттель В. Растворы и бетоны на нецементных вяжущих - М.:Стройиздат, 1990. – 240 с.
5. Баженов Ю.М. Технология бетона. –М.:Высш. Шк., 1987 – 415с.
6. Овчинников П.Ф., Круглицкий Н.Н., Михайлов Н.В. Реология тиксотропных систем. – К.:Наук.думка, 1972. – 160с.
7. Рунова Р.Ф., Шейнич О.Л., Гелевера О.Л., Гоц В.І. Основи виробництва стінових та оздоблювальних матеріалів -К., КНУБА 2001. – 354с.
8. Ахметов Д. А. Ячеистый бетон для ограждающих изделий высотных зданий: автореф. дис. докт. техн. наук.:05.23.05 – «Строительные материалы и изделия» / Ахметов Дмитрий Анатольевич; – Алматы, 2010 – 20 с.
9. Галкин С.Л., Сажнев Н.П., Соколовский Л.В. Применение ячеистобетонных изделий. Теория и практика. – Минск: НП ООО "Стринко", 2006. – 448 с.
10. Парута В.А. Оптимизация работы системы «кладка-покрытие» /Парута В.А., Брызин Е.В., Шаповалова А.В., Пастушенко Ю.В. Вісник ОАБА, №35. Одеса «Місто майстрів» – 2009 – С. 265-272.
11. Довгань И.В. Вяжущие материалы как неравновесные системы / Довгань И.В., Колесников А.В., Семенова С.В. // Вісник ОДАБА: сб. наук. пр., № 27, – Одеса „Зовнішрекламсервіс”, – 2007. – С.156-159.
12. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах –М.: Мир, 1979. – 503 с.

13. Komlos K. Uber das kapillarschwinden von zementleimen, morteln und betonen //TIZ-Fachber. —№11. 1986.—P.750-755.
14. Шейкин А.Е., Чеховский Ю.В., Бруссер М.И. Структура и свойства цементных бетонов – М.: Стройиздат, 1979. –344 с.
15. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Гоц В.И. Испытание бетонов и растворов, проектирование их составов – Изд-во: Инфра-инженерия, 2014. – 448с.
1. Basin V.Ye. Adgezionnaya prochnost'. – М.: Khimiya, 1981. – 208 s.
2. Yakovlev A.D. Khimiya i tekhnologiya lakokrasochnykh pokrytiy. – L.: Khimiya, 1989. – 384 s.
3. Pishcheva T.I. Optimizatsiya reologicheskikh i ekspluatatsionnykh svoystv spetsial'nykh shtukaturnykh rastvorov iz sukhikh smesey Spetsial'nost' 05.23.05-Stroitel'nyye materialy i izdeliya Diss. Na soisk. Stepen. Kand.tekhn. nauk. Odessa, OGASA, 2002, 176s.
4. Shul'tse V., Tisher V., Eyottel' V. Rastvory i betony na netsementnykh vyazhushchikh - M.:Stroyizdat, 1990. – 240 s.
5. Bazhenov YU.M. Tekhnologiya betona. –M.:Vyssh. Shk., 1987 – 415s.
6. Ovchinnikov P.F., Kruglitskiy N.N., Mikhaylov N.V. Reologiya tiksotropnykh sistem. – K.:Nauk.dumka, 1972. – 160s.
7. Runova R.F., Sheynych O.L., Helevera O.L., Hots V.I. Osnovy vyrobnytstva stinovykh ta ozdobyval'nykh materialiv -K., KNUBA 2001. – 354s.
8. Akhmetov D. A. Yacheisty beton dlya ograzhdayushchikh izdeliy vysotnykh zdaniy: avtoref. dis. dokt. tekhn. nauk.:05.23.05 – «Stroitel'nyye materialy i izdeliya» / Akhmetov Dmitriy Anatol'yevich; – Almaty, 2010 – 20 s.
9. Galkin S.L., Sazhnev N.P., Sokolovskiy L.V. Primeneniye yacheistobetonnykh izdeliy. Teoriya i praktika. – Minsk: NP OOO "Strinko", 2006. – 448 s.
10. Paruta V.A. Optimizatsiya raboty sistemy «kladka-pokrytiye» /Paruta V.A., Brynzin Ye.V., Shapovalova A.V., Pastushenko Yu.V. Vistnik OABA, №35. Odesa «Misto maystriv» – 2009 – S. 265-272.
11. Dovgan' I.V. Vyazhushchiye materialy kak neravnovesnyye sistemy / Dovgan' I.V., Kolesnikov A.V., Semenova S.V. // Visnik ODABA: sb. nauk. pr., № 27, – Odesa „Zovnishreklamservis”, – 2007. – S.156-159.
12. Nikolis G., Prigozhin I. Samoorganizatsiya v neravnovesnykh sistemakh –M.: Mir, 1979. – 503 s.
13. Komlos K. Uber das kapillarschwinden von zementleimen, morteln und betonen //TIZ-Fachber. —№11. 1986.—P.750-755.
14. Sheykin A.Ye., Chekhovskiy YU.V., Brusser M.I. Struktura i svoystva tsementnykh betonov – М.: Stroyizdat, 1979. –344s.
15. Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Gots V.I. Ispytaniye betonov i rastvorov, proyektirovaniye ikh sostavov – Izd-vo: Infra-inzheneriya, 2014. – 448s.

ОЦІНКА ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНИХ ОРГАНО-КРЕМНЕЗЕМИСТИХ ДОБАВОК НА ПРОЦЕСИ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ У ЧАСІ ЦЕМЕНТНИХ КОМПОЗИЦІЙ

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF COMPLEX ORGANIC-SILICATE ADDITIVES ON STRUCTURING PROCESSES IN TIME OF CEMENT COMPOSITIONS

Пушкарьова К.К., д.т.н., проф., (Київський національний університет будівництва та архітектури), **Каверин К.О., к.т.н., доц.,** (Київський національний університет будівництва та архітектури)

Pushkarova K.K., doctor of technical sciences, professor (Kyiv National University of Civil Engineering & Architecture), **Kaverin K.A., Ph.D., Assoc.,** (Kyiv National University of Civil Engineering & Architecture)

В статті встановлено ефективність модифікації цементних композицій органо-кремнеземистими добавками, які мають позитивний вплив на формування фазового складу і порової структури штучного каменю та забезпечують його довговічність.

The article establishes the effectiveness of organo-silica additives for modification of cement compositions, which have a positive effect on the formation of the phase composition and pore structure of artificial stone and ensure its durability.

The peculiarities of modification of Portland cement matrix by different types of polycarboxylate superplasticizers were investigated and it was found that the use of PowerFlow 3100 MC provides intensive strength gain in the early stages of hardening, and the use of SikaPlast 555W - intensive cement stone hardness set.

The effectiveness of the joint action of polycarboxylate superplasticizers and micro silica of different brands in the composition of organo-mineral additive was investigated and it was found that the highest value of durability is achieved when using the polycarboxylate superplasticizer SikaPlast 555W in the amount of 1.5% together with micro silica U40 in amount of 9% together with micro silica Grade 5 El by weight of cement. The use of such an additive increases the strength of the samples by more than 2 times compared to the control samples.

The phase composition of the tumors was investigated and it was shown that with the introduction of the complex organo-silica additive to Portland

cement there is a tendency of increasing the phases of low-basic calcium hydrosilicates C-S-H (I), C-S-H (II), tobermorite 11,3Å; in the later stages of hardening recrystallization of needle-like low-basic calcium hydrosilicates in the plate is observed, which leads to compaction and reinforcement of the microstructure, which gives grounds for claiming the formation of high-strength and durable structure of cement stone.

Ключові слова: Модифікована цементна матриця, полікарбоксилатний суперпластифікатор, мікрокремнезем, комплексна орґано-мінеральна добавка, міцність при стиску.

Modified cement matrix, polycarboxylate superplasticizer, microsilica, complex organo-mineral additive, compressive strength.

Вступ. Одним з найбільш перспективних напрямків технічного прогресу в технології бетону є формування оптимальної структури цементного каменю, що дозволяє значно підвищити стійкість до зовнішніх впливів та поліпшити комплекс фізико-технічних властивостей композицій за допомогою різних хімічних модифікаторів. Такі добавки при введенні в невеликих кількостях істотно впливають як на фізико-хімічні процеси твердіння в'язучих речовин, так і на технологічні властивості бетонних сумішей та на фізико-механічні властивості бетону, отриманого при їх твердінні, а також і на довговічність самих матеріалів [1, 3].

Проблемою модифікації цементних матриць комплексними добавками на основі суперпластифікаторів та мікрокремнезему займалися вчені Ю.М. Баженов [1], В.Г. Батраков [2], Л.Й. Дворкін [3] та інші [4, 5]. Таким чином, довговічність будівельних матеріалів визначається як об'єктивними факторами (умови експлуатації, кліматичною зоною, особливостями конструктивних рішень), так і суб'єктивними, що пов'язані з характером мікро-, мезо- та макроструктури штучного каменю. Нарощування міцності штучного цементного каменю у часі обумовлюється характером мікроструктури, а саме стабільністю фазового складу новоутворень. Спеціальні властивості штучного каменю, в тому числі підвищена корозійна стійкість, обумовлюються не тільки складом та характером мікроструктури, але й видом макроструктури, в тому числі видом крупного заповнювача та можливістю його взаємодії з елементами мікроструктури.

Тому дослідження взаємозв'язку "склад – структура – властивості – технологія", є тим ключем, що відкриває можливості створення довговічних будівельних матеріалів з потрібними характеристиками.

Метою роботи є дослідження впливу орґано-кремнеземистої добавки в складі портландцементної матриці на процеси структуроутворення і стабільність нарощування фізико-механічних характеристик штучного каменю у часі.

Сировинні матеріали та методи досліджень. Як вихідні сировинні матеріали в дослідженнях використовували портландцемент ПЦ 500-I-H, суперпластифікатори різних типів і марок на основі полікарбоксилатів (Sika ViscoCrete-5-600UA, SikaPlast 555W, SikaPlast 2508UA, MC PowerFlow 3100) та на основі ефірів полікарбоксилатів (MC PowerFlow 2695); тонкодисперсні активні мінеральні добавки на основі мікрокремнезему різних видів: побічні продукти Стаханівського феросплавного заводу ($S_{\text{пшт}}=36398 \text{ см}^2/\text{г}$), ВАТ «АрселорМіттал Кривий ріг» ($S_{\text{пшт}}=9478 \text{ см}^2/\text{г}$) та продукти торгових марок Elkem Microsilica Grade 940-U ($S_{\text{пшт}}=24795 \text{ см}^2/\text{г}$) та SikaFume ($S_{\text{пшт}}=8556 \text{ см}^2/\text{г}$).

Дослідження проводили з використанням комплексу фізико-механічних та фізико-хімічних методів досліджень згідно діючих нормативних документів. Суперпластифікатори вводили у кількості 0,5%, 1,0% та 1,5%, а мікрокремнезем – у кількості 5%, 10% і 15% від маси цементу відповідно. Визначення кінетики зміни міцності при стиску контрольних і модифікованих зразків проводили на зразках-кубах розмірами $2 \times 2 \times 2$ см за стандартною методикою і в стандартних умовах у віці 3,7, 28, 180, 365, 730 діб та 5 років. Водоцементне відношення (В/Ц) для зразків-кубів на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-мінеральною добавкою, становило 0,24.

Результати досліджень. Дослідження фізико-механічних характеристик цементних зразків-кубів на основі портландцементу ПЦ 500-I-H, модифікованого вище зазначеними суперпластифікаторами в кількості 0,5...1,5% від маси цементу (рис.1), дозволяють відмітити наступне: на ранніх етапах твердіння (3 доба) найбільший ефект досягається при використанні добавки суперпластифікатора MC PowerFlow 3100 в кількості 1% від маси цементу (рис.1.г), при цьому міцність при стиску досягає 68,75 МПа, що в 4,7 рази більше міцності контрольних зразків. Як контрольні зразки були вибрані зразки на основі немодифікованого портландцементу.

На 28 добу найбільш ефективною, з точки зору міцності, була добавка суперпластифікатора SikaPlast 555W (рис.1.б) в кількості 1,5% від маси цементу, використання якої дозволило підвищити міцність штучного каменю при стиску до 100,9 МПа, що в 2 рази більше порівняно з міцністю контрольних зразків.

На пізніх термінах твердіння (5 років) найбільш ефективною виявилася добавка суперпластифікатора SikaPlast 555W (рис.1.б) в кількості 1% від маси цементу, використання якої дозволило підвищити міцність при стиску до 126,9 МПа, що на 43% більше порівняно з міцністю контрольних зразків.

Враховуючи отримані дані для подальших досліджень в якості пластифікуючої добавки доцільно використовувати суперпластифікатор MC PowerFlow 3100, який забезпечує підвищення міцності на ранніх етапах твердіння, або SikaPlast 555W, який сприяє прискореному нарощуванню міцності в більш пізні терміни твердіння зразків.

Наступним етапом досліджень було встановлення ефективності сумісної роботи полікарбонатного суперпластифікатора та різних видів мікрокремнезему (рис. 2, 3) при модифікації вищевказаної цементної матриці.

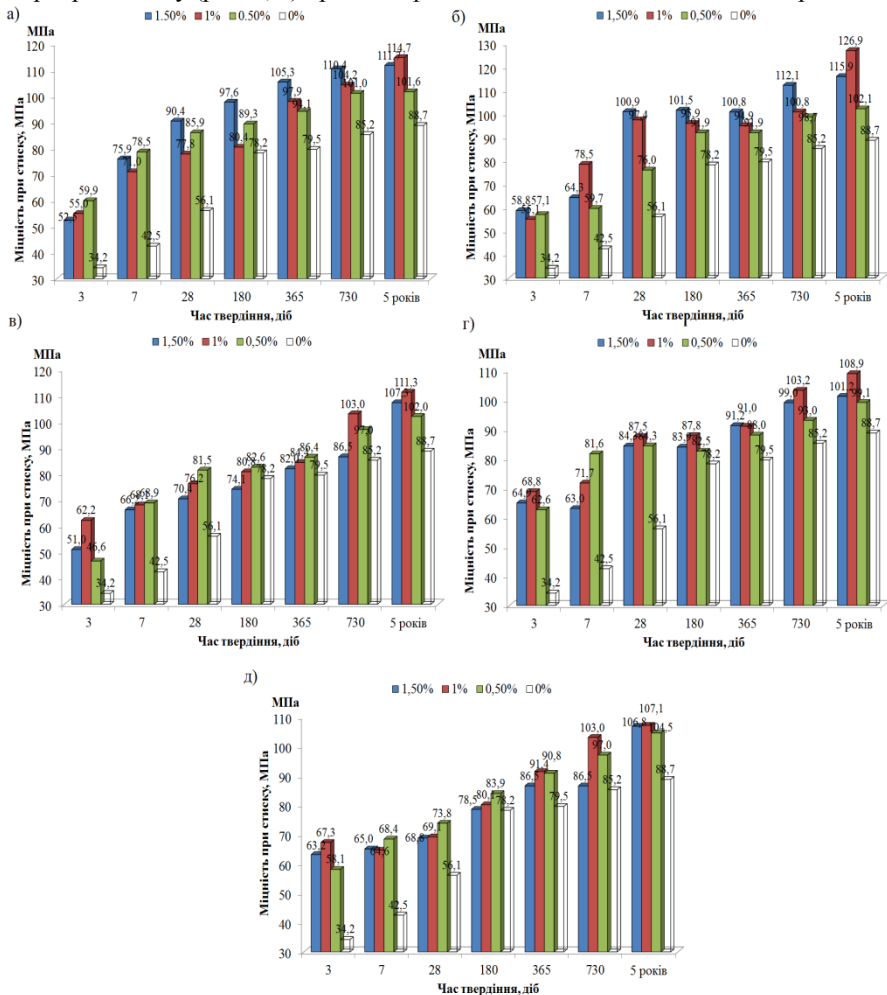


Рис. 1. Міцність при стиску зразків цементного каменю на основі портландцементу ПЦ 500-I-N, модифікованого суперпластифікаторами різних марок: Sika ViscoCrete-5-600UA(а), SikaPlast 555W(б), SikaPlast 2508UA(в), MC PowerFlow 3100(г), MC PowerFlow 2695(д)

Аналіз отриманих даних дозволяє відзначити, що найбільш ефективною виявилась модифікація цементної матриці розробленою комплексною

органокремнеземистою добавкою на основі суперпластифікатора SikaPlast 555W та МК «Microsilica Grade 940-U», що сприяє збільшенню міцності: на 3 добу на 166%, на 7 добу – на 114%, на 28 добу – на 96%, на 180 добу – на 43%, на 365 добу – на 51%, на 730 добу та на 5 років – на 61%, порівняно з контрольними зразками (рис.2, 3).

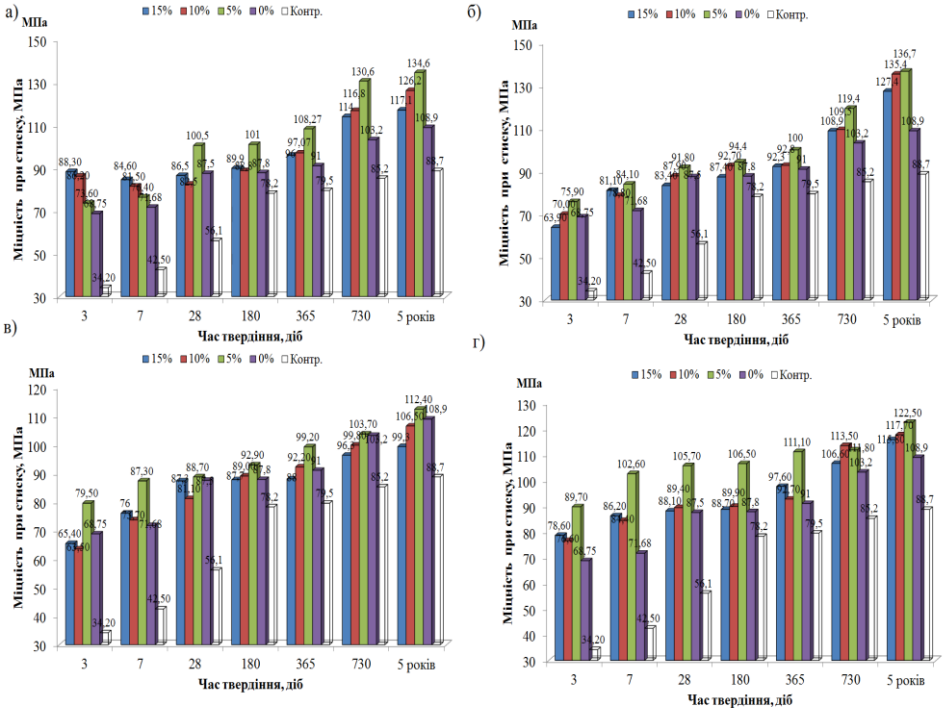


Рис. 2. Міцність при стиску зразків цементного каменю на основі портландцементу ПЦ 500-I-H і суперпластифікатора MC PowerFlow 3100, модифікованого мікрокремнеземом різних марок: стаханівський (а), Elkem Microsilica Grade 940-U(б), SikaFume(в), криворізький (г)

Порівнюючи діаграми на рис. 2 і 3 можна відмітити, що на ранніх етапах твердіння портландцементних композицій також досить високі показники нарощування міцності можна отримати в разі використання комплексної добавки, що містить суперпластифікатор MC PowerFlow 3100 в кількості 1% та МК «Криворізький» в кількості 5% від маси цементу. Результати приросту міцності зразків, модифікованих комплексними органокремнеземистими добавками представлені в табл. 1.

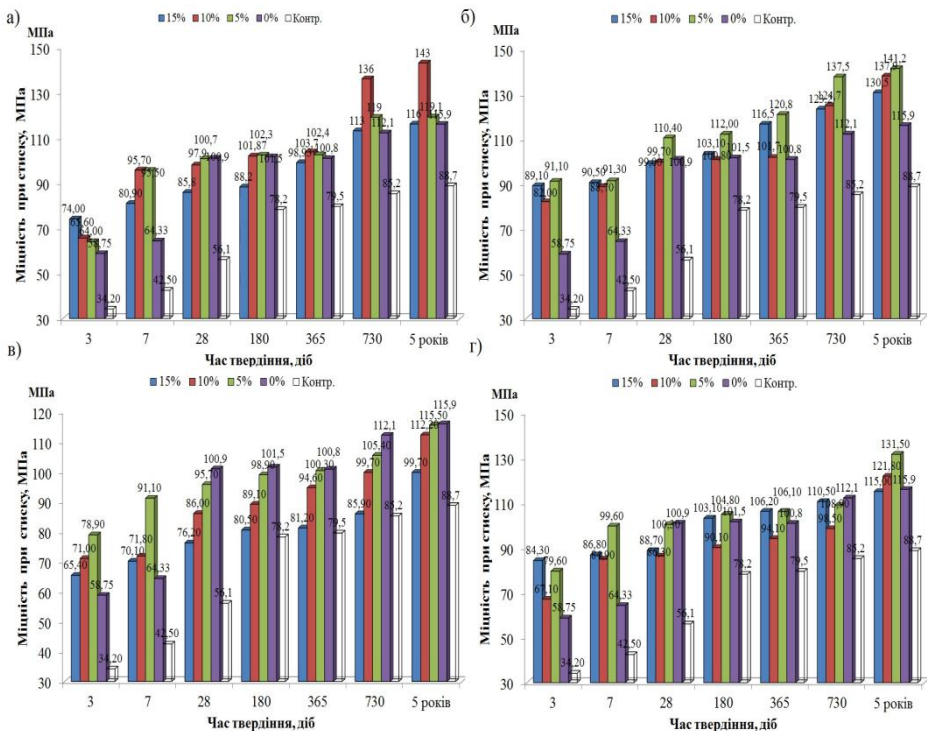


Рис. 3. Міцність при стиску зразків цементного каменю на основі портландцементу ПЦ 500-I-Н і суперпластифікатора SikaPlast 555W, модифікованого мікрокремнеземом різних марок: стаханівський (а), Elkem Microsilica Grade 940-U(б), SikaFume(в), криворізький(г)

Таблиця 1.

Приріст міцності портландцементних зразків, модифікованих комплексною добавкою залежно від часу твердіння

Складові комплексної добавки	Час твердіння						
	3 доби	7 діб	28 діб	180 діб	365 діб	730 діб	5 років
	Результати приросту міцності (%)						
SikaPlast 555W+ МК «Microsilica Grade 940-U»	166	114	96	43	51	61	61
MC PowerFlow 3100+ МК «Криворізький»	162	141	88	36	39	33	38

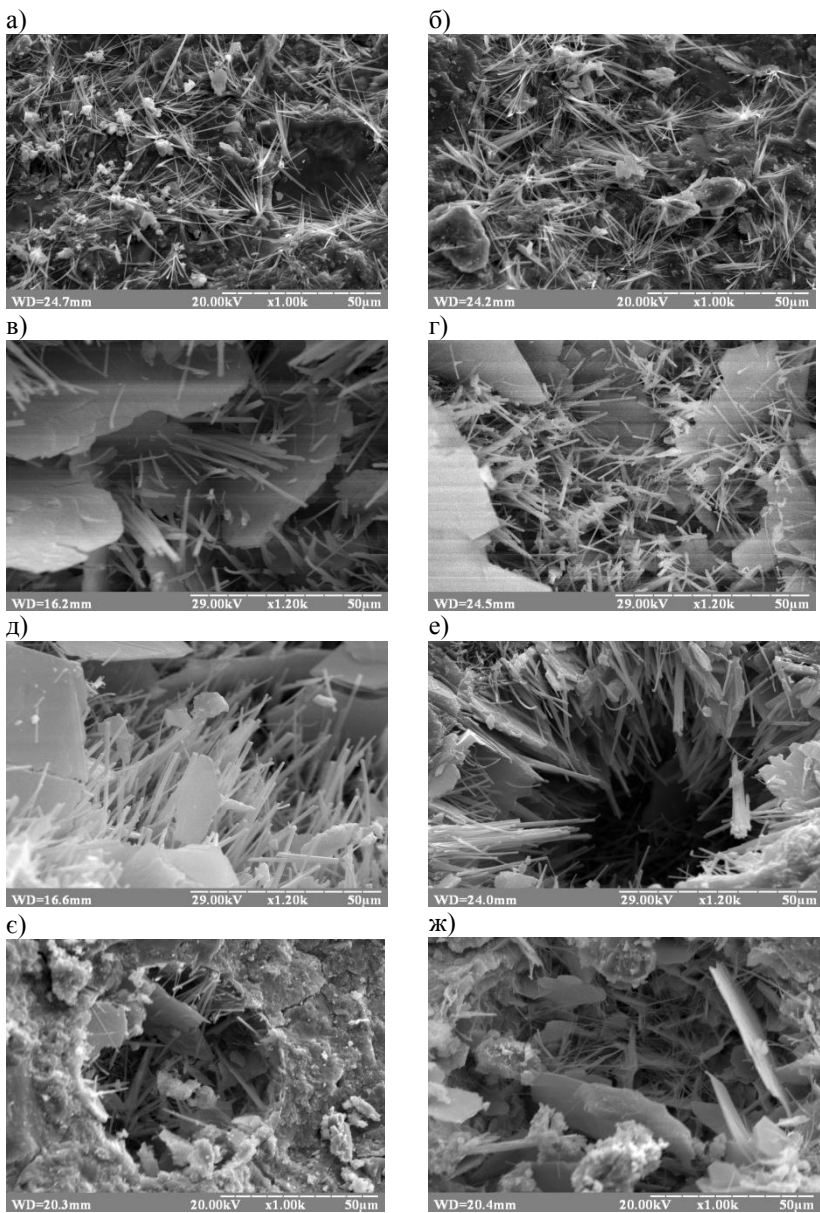


Рис. 4. Фотографії мікроструктури цементного каменю, модифікованого комплексною добавкою після 28 діб (а, б), 365 діб (в, г), 730 діб (д, е) та 5 років(є, ж) твердіння

Проведений аналіз результатів дослідження свідчить про ефективність модифікації комплексною органо-мінеральною добавкою цементних матриць у часі; також можна відмітити, що зразки, які тверділи протягом 365, 730 діб та 5 років мають стабільний приріст міцності на рівні 50...60%, порівняно з міцністю немодифікованих зразків, що підтверджує доцільність модифікування та її позитивний вплив на довговічність штучного каменю.

Для уточнення особливостей процесів структуроутворення, що відбуваються при модифікації портландцементу комплексною органо-кремнеземистою добавкою, за допомогою електронної мікроскопії було досліджено поверхню сколу штучного каменю після 28, 365, 730 діб та 5 років твердіння (рис. 4, а...ж).

Згідно отриманим даним (рис. 4, а – б) на фотографіях сколу зразків фіксується утворення великої кількості модифікованих голкоподібних гідросилікатів кальцію довжиною 5...20 мкм, що відносяться до типу CSH (I) та тобермориту 11,3Å.

Через 365 діб (рис. 4, в – г) гідратації на поверхні сколу штучного каменю на основі портландцементу, модифікованого комплексною органо-кремнеземистою добавкою, чітко видно волокнисті утворення та частково перекристалізовані у пластинчасті – голчасті кристали низькоосновних гідросилікатів кальцію.

Через 730 діб та 5 років твердіння зразків (рис. 4, е – ж) за даними електронної мікроскопії (рис. 4, д – е) на поверхні сколу штучного каменю, модифікованого комплексною добавкою, спостерігається потовщення волокнистих кристалічних новоутворень та формування пластинчастих низькоосновних гідросилікатів, що сприяє майже повному зарощуванню пор та приводить до зміни порової структури цементної матриці, в якій починає переважати гелева складова.

Висновки. Досліджено особливості модифікації портландцементної матриці різними видами полікарбоксилатних суперпластифікаторів та встановлено, що використання добавки MC PowerFlow 3100 забезпечує інтенсивний приріст міцності на ранніх етапах твердіння, а використання SikaPlast 555W — інтенсивний набір міцності цементного каменю на пізніх етапах твердіння.

Досліджено ефективність сумісної дії полікарбоксилатних суперпластифікаторів та мікрокремнеземів різних торгових марок в складі органо-мінеральної добавки та встановлено, що найбільше значення міцності досягається при використанні полікарбоксилатного суперпластифікатора SikaPlast 555W в кількості 1,5% разом з мікрокремнеземом Elkem Microsilica Grade 940-U в кількості 5 % від маси цементу. Застосування такої добавки дозволяє збільшити показники міцності зразків більше ніж у 2 рази, порівняно з контрольними зразками

Досліджено фазовий склад новоутворень та показано, що при введенні комплексної органо-кремнеземистої добавки до портландцементу має місце тенденція збільшення фаз низькоосновних гідросилікатів кальцію С-S-H(I), С-S-H(II), тобермориту 11,3Å; на пізніх етапах твердіння спостерігається перекристалізація голчастих низькоосновних гідросилікатів кальцію в пластинчасті, що призводить до ущільнення та армування мікроструктури, що дає підстави стверджувати про утворення високоміцної та довговічної структури цементного каменю.

1. Баженов Ю.М. Технология бетона – М.: Изд-во АСВ, 2002. – 528с.

Vazhenov Yu.M. Tehnologiya betona – М.: Izd-vo ASV, 2002. – 528s.

2. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика, изд. 2-е, переработанное и дополненное. - М. 1998. - 768 с.

Batrakov V.G. Modificirovannye betony. Teoriya i praktika, izd. 2-e, pererabotannoe i dopolnennoe. - М. 1998. - 768 с.

3. Дворкин Л.И. Модифицирование микроструктуры цементного камня суперпластификаторами. — В кн: Крат. тез. доклад на VI Всесоюз. научн.-техн. совещ. по химии цемента. - М, 1982. - С.136.

Dvorkin L.I. Modificirovanie mikrostruktury cementnogo kamnya superplastifikatorami. — В кн: Крат. тез. доклад на VI Vsesoyuz. nauchn.-tehn. sovesh. po himii cementa. - М, 1982. - С.13.

4. Пушкарьова К.К. Особливості модифікації цементної матриці для отримання високоміцних легких керамзитобетонів/ К. К. Пушкарьова, О. А. Гончар, К. О. Каверин // Будівельні матеріали, виробы та санітарна техніка. – 2014. – Вип. 52. – С. 43–48.

Pushkarova K.K. Osoblivosti modifikaciyi cementnoyi matrici dlya otrimannya visokomicnih legkih keramzitobetoniv/ K. K. Pushkarova, O. A. Gonchar, K. O. Kaverin // Budivelni materialy, viroby ta sanitarna tehnik. – 2014. – Vip. 52. – S. 43–48.

5. Пушкарьова К.К. Дослідження високоміцних цементних композицій, модифікованих комплексними органо-кремнеземистими добавками/ Пушкарьова К.К., Каверин К.О., Калантаєвський Д.О. // Восточно-Европейский журнал передовых технологий №5 (77) – 2015. Харків – с.42-51.

Pushkarova K.K. Doslidzhennya visokomicnih cementnih kompozicij, modifikovanih kompleksnimi organo-kremnezemistimi dobavkami/ Pushkarova K.K., Kaverin K.O., Kalantayevskij D.O. // Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij №5 (77) – 2015. Harkiv – s.42-51.

МЕТОДОЛОГІЯ ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ДОБАВОК ДЛЯ БЕТОНІВ

METHODOLOGY FOR THE IMPLEMENTATION OF NEW CONCRETE ADDITIVES

Рунова Р.Ф., д.т.н., проф., Руденко І.І. к.т.н., Товстони́с В.В. асп. (Київський національний університет будівництва та архітектури),
Чудновський С.М. к.т.н. , Погореляк О.А, директор (ТОВ НВП «МІСТІМ»)

Runova R.F., Doctor of Tech. Sc., Professor, Rudenko I.I., Ph.D., Tovstonis V.V., asp. (Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture), **S.M. Chudnovsky, Ph.D., Pogorelyak O.A., Director** (MISTIM LLC)

Запропоновано методичний підхід до визначення ефективності суперпластифікуючих добавок на полікарбоксілатній основі для їх впровадження у виробництво у найбільш короткі строки. Робота виконана на прикладі добавки “КОМПЛЕКС К-15” виробництва ТОВ НВП «МІСТІМ».

A methodological approach to determining the effectiveness of polycarboxylate-based superplasticizing additives is proposed to introduce them into production as soon as possible. The work was performed on the example of the COMPLEX K-15 additive manufactured by MISTIM LLC.

In accordance with the classification of DSTU B V.2.7-65-97 additive "COMPLEX K-15" belongs to the plasticizing additives of group I (superplasticizers). The optimal dosage of the additive, according to the requirements of DSTU B V.2.7-69-98, is within 0.57% by weight of cement (2.0 l/m³) with standard concrete mix formulations. However, there is no negative effect of the additive on the strength of concrete.

When using the COMPLEX K-15 additive, high technical performance of commercial concrete mixes with the content of Portland cement 350 kg/m³ (no water separation and delamination, density of the concrete mixture 2385... 2460 kg/m³, loss of mobility of the concrete mixture (OK) from 22... 23 cm up to 4... 5 cm in 2 h) and concrete (compressive strength for the 28th day 45.9... 56.3 MPa) can be provided by replacing some of the sand with chalk and fuel fly ash.

Ключові слова: бетонна суміш, суперпластифікатор, самоущільнення, рухомість суміші, зола виносу.

Concrete mix, superplasticizer, self-compacting, mixture mobility, fly ash.

Вступ. Багаторічний досвід використання національного стандарту ДСТУ Б В.2.7-69 показав доцільність наведених у ньому методичних підходів до визначення ефективності добавок для бетонів самого різного призначення за широким спектром критеріїв ефективності у відповідності з ДСТУ Б В.2.7-65. Але в теперішній час будівництво потребує нових видів бетонів, в т.ч. високоміцних, здатних до самоущільнення і т.д. Високі функціональні властивості таких бетонів можуть бути забезпечені, в першу чергу, за рахунок високоефективних хімічних добавок. Оскільки функціональність бетонів нового покоління постійно розширюється, методичні підходи до перевірки ефективності, апробації і впровадження добавок мають доповнюватися. Крім того, в останні роки ринок добавок для бетонів нового покоління почав поповнюватися продуктами вітчизняного виробництва. Метою авторів було запропонувати методичний підхід до визначення ефективності пластифікуючих добавок для їх впровадження у виробництво у найбільш короткі строки. Робота виконана на прикладі добавки марки “Комплекс К-15” виробництва ТОВ НВП “МИСТИМ”.

Ефективність добавки за стандартною методикою. Згідно [1] ефективність пластифікуючої добавки визначають за зміною рухомості бетонної суміші та міцності бетонних зразків після теплової обробки (через 4 год та 28 діб) та/або тверднення в нормальних умовах на три терміни випробувань (3, 7 і 28 діб). Критерієм ефективності є збільшення рухомості бетонної суміші (ОК, см) без зниження міцності бетону протягом всього строку випробування [2]. При цьому стандартом регламентується витрата цементу в складі бетону 350 кг/м³.

Згідно [1] оптимальне дозування добавки – мінімальна кількість добавки, при введенні якої до складу бетону досягається максимальний ефект дії за критерієм ефективності у відповідності з [2].

У відповідності з вимогами [1] (п. 3.9) було прийнято контрольний склад бетонної суміші:

- портландцемент ПЦ-I-500	350 кг;
- пісок річковий	740 кг;
- щебінь гранітний	
фракція 5 – 10 мм	330 кг;
фракція 10 – 20 мм	780 кг.

Для забезпечення рухомості бетонної суміші контрольного складу в межах 2-4 см. (згідно [1], п.5.1.3) було встановлено значення В/Ц =0,54, яке надалі було прийнято незмінним для основних складів (табл.1).

Рухомість бетонної суміші, навіть з мінімальним дозуванням добавки, підвищується від марки Р1 до Р5. Необхідно відмітити, що при збільшенні витрати добавки в бетонній суміші відмічається тенденція до підвищеного водовідділення.

Таблиця 1

Рухливість бетонних сумішей

Склад бетонної суміші	Маркування	Кількість добавки, % від маси цементу (л/м ³)	Склад бетонної суміші, кг/м ³				В/Ц	ОК, см
			Ц	П	Щ фракції, мм			
					5...10	10...20		
2	1	3	4	5	6	7	8	9
Контрольний склад - без добавки	КС	-	350	740	330	780	0,54	4
Основний склад 1	ОС1	0,57 (2,0 л)	350	740	330	780	0,54	23
Основний склад 2	ОС2	0,95 (3,33 л)	350	740	330	780	0,54	24
Основний склад 3	ОС3	1,33 (4,66 л)	350	740	330	780	0,54	24
Основний склад 4	ОС4	1,71 (6,0 л)	350	740	330	780	0,54	20

Міцність на стиск бетонних зразків відповідних складів наведена в табл. 2 та на рис.1. Результати свідчать про відсутність негативного впливу добавки на показники міцності бетону протягом всього строку випробувань.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості бетонів

Склад бетонної суміші	Маркування	Середня густина бетону, кг/м ³	Міцність на стиск, МПа, після тверднення в нормальних умовах впродовж		
			3 діб	7діб	28діб
2	1	3	4	5	6
Контрольний Склад	КС	2411	15,5	25,5	34
Основний склад 1	ОС1	2372	16,7	25,2	38,5
Основний склад 2	ОС2	2414	15,9	21,8	34
Основний склад 3	ОС3	2425	12,1	22	31,2
Основний склад 4	ОС4	2430	11,9	25,6	39,1

Примітки.

1. Поява водовідділення в бетонній суміші складу ОС2;
2. Відбувається осідання цементно-піщаної матриці в складах ОС3 та ОС4, при цьому крупний заповнювач залишається без обмазки. Вода практично повністю відділяється від розчинової частини.

Найкращі результати отримано при витраті добавки 2,0 л на 1 м³ бетонної суміші (основний склад 1). Особливо слід відмітити результати отримані при витраті добавки 6,0 л на 1 м³ бетонної суміші (основний склад 4). Осадка конуса становить 20 см і міцність на 28 добу перевищує міцність зразків основного складу 1. Проте слід зауважити, що даний склад бетонної суміші не є технологічним. В зв'язку із значним відділенням води від розчинової частини, під час укладання бетонної суміші у форму та при подальшому її вібруванні практично вся вода витекла з форми. Залишилася практично одна цементно-піщана матриця, яка й забезпечила міцність вищу ніж міцність основного складу 1.

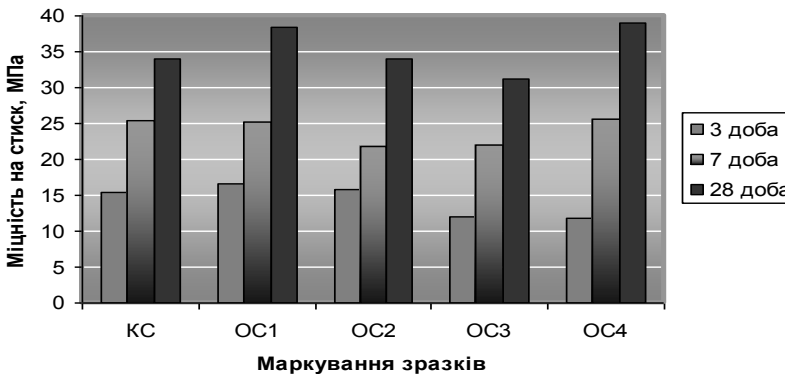


Рис. 1. Міцність бетону контрольного складу та з різним дозуванням добавки

Апробація добавки в рецептурі бетону. Для усунення ефекту водовідділення було замінено частину піску в стандартному складі (згідно [1]) на паливну золу-винесення та крейду. Паливну золу-винесення вводили в діапазоні 50...90 кг та крейду 30...70 кг на 1 м³ бетонної суміші при відповідному зменшенні витрати піску.

Значення В/Ц залишалось незмінним (0,4) для всіх складів для аналізу ефекту водовідділення.

Отримані результати наведені на рис. 2 і 3 та в табл. 3.

Міцність зразків з заміною частини піску на золу та крейду значно перевищує показники міцності, які отримано на першому етапі робіт. Міцність зразків складів 3-70, 3-90 та К-50 досягає класу за міцністю В40, а міцність складів 3-50, К-30 та К-70 досягає класу за міцністю В35. Найвищі міцнісні характеристики отримано при вмісті паливної золи-винесення 70 та 90 кг/м³ бетону, та при вмісті крейди 50 кг/м³ бетону.

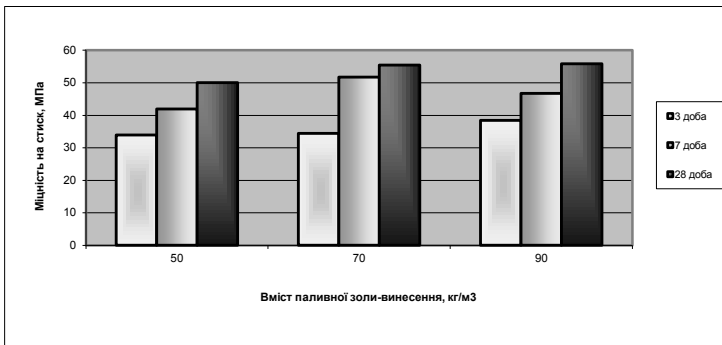


Рис. 2. Міцність зразків стандартного складу з заміною частини піску на паливну золю-винесення

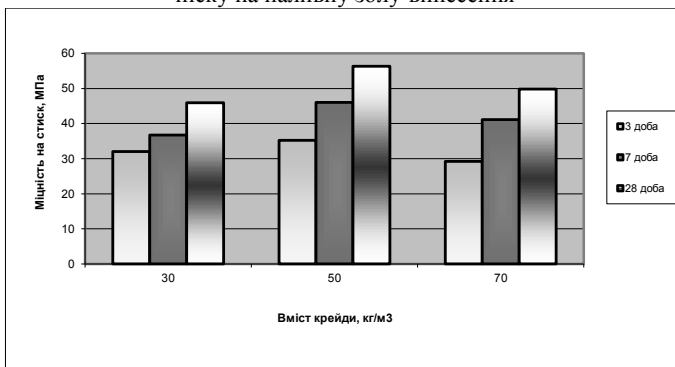


Рис.3. Міцність зразків стандартного складу з заміною частини піску на крейду

Проаналізувавши приріст міцності бетону (в порівнянні з основним складом 1) при введенні паливної золи-винесення можна відзначити певну залежність: найінтенсивніший приріст міцності спостерігається на початкових строках тверднення (від 103 до 130% на 3 добу), та в подальшому поступово знижується (від 66 до 105% на 7 добу та від 30 до 45% на 28 добу). При заміні частини піску на крейду тенденція зберігається, але приріст міцності (в порівнянні з основним складом 1) не такий інтенсивний як при введенні паливної золи-винесення. Так на 3 добу приріст міцності знаходиться в межах 75...110%, на 7 добу 46...82%, та на 28 добу 19...46%.

Загальною особливістю бетонних сумішей наведених складів є відсутність збереження рухомості через 2 години. Зберегли рухомість через 1 годину бетонні суміші складів 3-70 (вміст паливної золи-винесення становить 70 кг/м³ бетону) та К-50, К-70 (вміст крейди становить, відповідно 50 та 70 кг/м³ бетону). Зміну рухомості бетонних сумішей запроєктованих складів за часом в нормальних умовах наведено на рис. 4 та рис. 5.

Таблиця 3

Фізико-механічні властивості бетонів

Шифр	3-50	3-70	3-90	К-30	К-50	К-70	
ПЦ-I-500	350	350	350	350	350	350	
Зола –виносу, кг/м ³	50	70	90	-	-	-	
Крейда, кг/м ³	-	-	-	30	50	70	
Пісок річковий дніпр., кг/м ³	690	670	650	710	690	670	
Щебінь фр. 5...10мм, кг/м ³	330	330	330	330	330	330	
Щебінь фр. 10...20мм, кг/м ³	780	780	780	780	780	780	
В/Ц	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	
Середня густина бетонної суміші, кг/м ³	2445	2385	2410	2410	2460	2418	
ОК, см	відразу	16	22	18	16	22	23
	1 година	5	21	6	10	17	19
	2 години	4	7	4	5	5	5
Середня міцність бетону на стиск після твердіння в н.у., МПа	3 доби	33,9	34,4	38,4	32	35,2	29,2
	7 діб	41,9	51,7	46,7	36,7	46	41,1
	28 діб	50	55,4	55,8	45,9	56,3	49,8
Клас бетону по міцності на стиск	B35	B40	B40	B35	B40	B35	

Примітка: клас бетону по міцності на стиск визначено згідно [3] при коефіцієнті варіації $V = 13,5\%$.

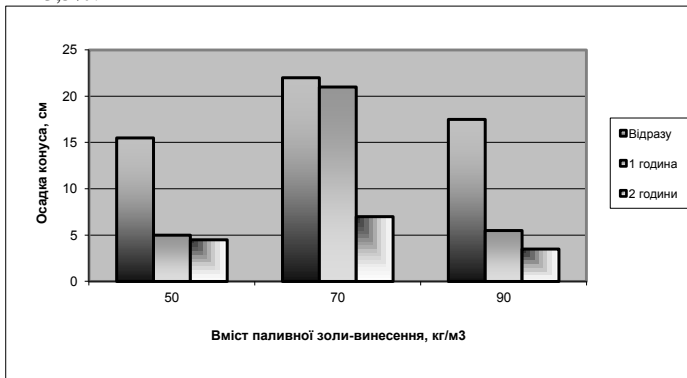


Рис.4. Зміна рухомості бетонних сумішей за часом при заміні частини піску на паливну золу-винесення

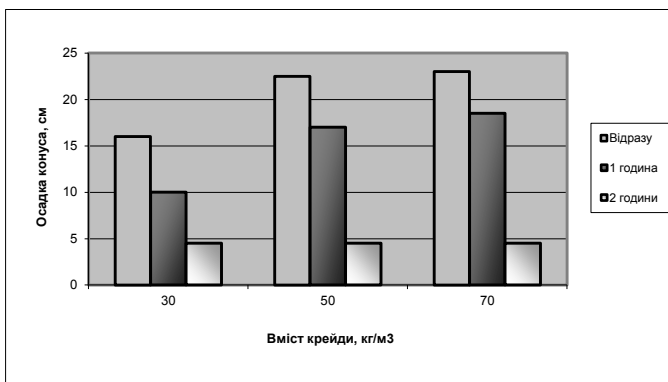


Рис.5. Зміна рухомості бетонних сумішей за часом при заміні частини піску на крейду

Висновки. У відповідності з класифікацією ДСТУ Б В.2.7-65-97 добавка “КОМПЛЕКС К-15” належить до пластифікуючих добавок I групи (суперпластифікаторів). Оптимальне дозування добавки, згідно вимог ДСТУ Б В.2.7-69-98, знаходиться в межах 0,57% від маси цементу ($2,0 \text{ л/м}^3$) при стандартних складах бетонної суміші. При цьому відсутній негативний вплив добавки на показники міцності бетону.

При використанні добавки “КОМПЛЕКС К-15” високі технічні показники товарних бетонних сумішей з вмістом портландцементу 350 кг/м^3 (відсутність водовідділення та розшарування, густина бетонної суміші $2385...2460 \text{ кг/м}^3$, втрата рухомості бетонної суміші (ОК) від 22...23 см до 4...5 см за 2 год) і бетонів (міцність на стиск на 28 добу $45,9...56,3 \text{ МПа}$) можуть бути забезпечені при заміні частини піску на крейду та паливну золу-винесення.

1. ДСТУ Б В.2.7-69-98. Добавки для бетонів. Методи визначення ефективності. DSTU B V.2.7-69-98. Dobavki dlya betoniv. Metodi viznachennya effektivnosti.
2. ДСТУ Б В.2.7-65-97. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Класифікація. DSTU B V.2.7-65-97. Dobavki dlya betoniv i budivelnih rozchiniv. Klasifikaciya.
3. ДСТУ Б В.2.7-43-96. Будівельні матеріали. Бетони важкі. Технічні умови. DSTU B V.2.7-43-96. Budivelni materialii. Betoni vazhki. Tehnichni umovi

ШВИДКОТВЕРДНУЧИ КЛІНКЕР-ЕФЕКТИВНІ БЕТОНИ

RAPID HARDENING CLINKER-EFFICIENT CONCRETES

Саницький М.А., д.т.н., проф., Кропивницька Т.П., к.т.н., доц., Рихліцька О.В., Яніцький О.Б. (Національний університет «Львівська політехніка»)

Sanytsky M., DrSc., Kropyvnytska T., PhD., Rykhlytska O., Janitsky O. (Lviv Polytechnic National University)

<https://orcid.org/0000-0002-8609-6079>, <https://orcid.org/0000-0003-0396-852X>

Розроблено принципи одержання наномодифікованих швидкотверднучих клінкер-ефективних бетонів на основі композиційних портландцементів, що базуються на керуванні синтезом міцності цементуючої матриці в бетоні, лужно-сульфатній активації та використанні нанокомпозитів.

It was developed the principles of obtaining nanomodified clinker-effective concretes based on composite cements, which provide a significant reduction of the "carbon footprint" in construction production technology. It was shown that optimization of particle size distribution of concrete mix components at different structural levels is of paramount importance for achieving high grain packing density. The influence of the consumption of composite Portland cement and polycarboxylate superplasticizer, was investigated by the method of experimental-statistical modeling, on the strength of concrete in the age 2 and 28 days. To evaluate the relationship between technical and environmental performance of concrete, was determined the effectiveness of clinker in concrete. It is shown that with the increasing of strength of modified concrete, based on Portland cement composite CEM II/B-M 32.5 R (clinker factor - 0.65), it is possible to significantly reduce the specific consumption of clinker per unit strength up to 4.5... 3.0 kg/(m³ MPa); accordingly, the CO₂-intensity is 3.9 ... 2.6 kg CO₂/(m³ MPa). Significant intensification of the processes, of early structure formation of clinker-efficient concretes, are ensured by the complex using of polycarboxylate super-plasticizers, sulfate-alkaline activation and nanomodification. The synergistic combination of high-dispersed mineral components, nanosilica and C-S-H-PCE nanocomposite ensures rapid hardening concrete C50/60 ($f_{cm2} / f_{cm28} = 0.51$). The development of nanomodified clinker-efficient concretes provides a rapid

pace of construction and addresses the challenges associated with the need for a low-carbon development strategy.

Ключові слова: клінкер-ефективний бетон, портландцемент композиційний, полікарбоксилатні етери, лужний активатор, наносиліка, висока рання міцність.

Clinker-efficient concretes, composite Portland cement, polycarboxylate ethers, alkaline activator, nanosilica, high early strength.

Аналіз останніх досліджень. На даний час одним із основних завдань цементної промисловості та будівельної галузі є зниження «вуглецевого сліду» [1, 2]. Найбільш ефективним шляхом вирішення даної проблеми є заміщення портландцементного клінкеру в складі цементів на активні мінеральні добавки гідравлічної або пуцоланічної дії, а також мікронаповнювачі. При цьому заміна кожного кілограму клінкеру в бетоні на цементозаміщуючі матеріали дозволяє зменшити емісію CO₂ на 0,6–1,0 кг [3]. Разом з тим, зниження клінкер-фактору в бетоні призводить до суттєвого зменшення його ранньої міцності. Тому для одержання ефективних низьковуглецевих бетонів слід дотримуватись принципів їх поетапного розроблення за рахунок застосування змішаних цементів високого класу міцності (не менше 42,5 Н/мм²), оптимізації водо-цементного відношення та цементуючого матеріалу в бетонній суміші [4].

Модифікування бетонної суміші високоефективними суперпластифікаторами на основі ефіру полікарбоксилату дозволяє отримати на портландцементях ПЦ I-500Н та ПЦ II/A-III-500 високоміцні бетони, які характеризуються також підвищеною міцністю через 12...24 год при рухомості бетонної суміші 20...24 см. Позитивний ефект впливу на ранню міцність бетону забезпечується також при введенні органо-мінеральних добавок прискорюючої дії [5-7]. Разом з тим, при використанні композиційних портландцементів з пониженим клінкер-фактором типу СЕМ II/B-M модифіковані бетони характеризуються недостатньо високою ранньою міцністю, що не відповідає вимогам сучасного будівництва [8].

Прискорення набору ранньої міцності бетону в значній мірі досягається за рахунок лужної активації та наномодифікування цементуючих систем [9-11]. Так, добавка наносиліки дозволяє значно прискорити ранню пуцоланову реакцію в лужному середовищі. При цьому за рахунок утворення низькоосновних фаз С-S-N (I) забезпечується значне підвищення міцності цементуючої матриці в ранній період тверднення. З іншої сторони також застосовуються технології, які полягають у введенні суспензії зародків фаз С-S-N, що значно прискорює розвиток ранньої міцності цементуючої матриці бетону [12].

Таким чином, важливими принципами прискорення тверднення клінкер-

ефективних бетонів на основі композиційних цементів є збільшення питомої поверхні їх компонентів, підвищення щільності упаковки цементуючої системи шляхом введення високоредуруючих добавок полікарбоксилатного типу та наномодифікаторів. У цьому плані значний практичний інтерес представляє дослідження сумісного впливу гіперпластифікаторів та комплексних наномодифікаторів на процеси структуроутворення і тверднення клінкер-ефективних бетонів на основі лужно-активованих композиційних портландцементів типу СЕМ ІІ/В-М (клінкер-фактор – 0,65).

Метою роботи є розроблення швидкотверднучих наномодифікованих клінкер-ефективних бетонів на основі портландцементу композиційного за критеріями ранньої та стандартної міцностей, встановлення особливості процесів їх структуроутворення на макро-, мезо-, мікро- і нанорівнях.

Матеріали і методи досліджень. Для отримання швидкотверднучих клінкер-ефективних бетонів використано портландцемент композиційний з високою ранньою міцністю СЕМ ІІ/В-М (S-P-L) 32,5 R ДСТУ Б EN 197-1 ПрАТ «Івано-Франківськцемент». В якості високоефективної водоредууючої добавки використано суперпластифікатор полікарбоксилатного типу (PCE) MasterGlenium ACE 430 (виробник BASF, Німеччина). Як лужний активатор тверднення наномодифікованих бетонів використано сульфат натрію (Na_2SO_4). В якості нанодобавки застосовано дисперсію колоїдного розчину нано- SiO_2 Levasil CB8 (вміст сухої речовини – 50 мас.%) з частинками, які мають сферичну форму розміром 10–50 нм; істинна густина $\rho=1,4$ г/см³, рН=9,5. Для прискорення процесу тверднення бетону застосовано нанокompозит на основі колоїдної суспензії C-S-H-PCE, отриманий шляхом синтезу методом золь-гель технології. Для проектування зернового складу заповнювачів застосовано дрібний пісок Жовківського родовища, гранітний щебінь двох фракцій: 2–5 мм та 5–20 мм.

Для визначення розподілу частинок за розміром нано- SiO_2 і СЕМ ІІ/В-М (S-P-L) 32,5 R застосовано лазерний аналізатор Master Sizer 3000 (Malvern Panalytical). Мікроструктуру наномодифікованого бетону досліджували з використанням растрового електронного мікроскопу РЕМ 106И, а мезо- та макроструктуру – з використанням стереоскопічного мікроскопу Bresser ETD-101. Вміст повітря в свіжозамішаній бетонній суміші проводили з використанням приладу для визначення об'єму повітрязахоплення фірми "TESTING". Для визначення морозостійкості наномодифікованих клінкер-ефективних бетонів використано камеру кліматичну HS 280/75.

Результати досліджень. Результати досліджень зернового складу заповнювачів, одержані методом сухого просіювання через набір сит згідно EN 933-1:2012-03, дозволяють оцінити вклад окремих фракцій для проектування кривої необхідного гранулометричного складу товарної бетонної суміші. За результатами розрахунків повних залишків побудовано криву зернового складу суміші заповнювачів. Як видно з рис. 1, запроектована крива суміші заповнювачів знаходиться між стандартними

кривими в області допустимих зернових складів. В той же час, в області фракцій від 0,30 до 1,70 мм спостерігається незначне відхилення запроєктованої кривої суміші від контрольної. В цілому, крива зернового складу заповнювачів знаходиться в області задовільного гранулометричного складу, що гарантує відповідну легковкладальність та консистенцію бетонної суміші при якомога найменшій кількості води та цементу (розчину), а також мінімальному вмісту повітря.

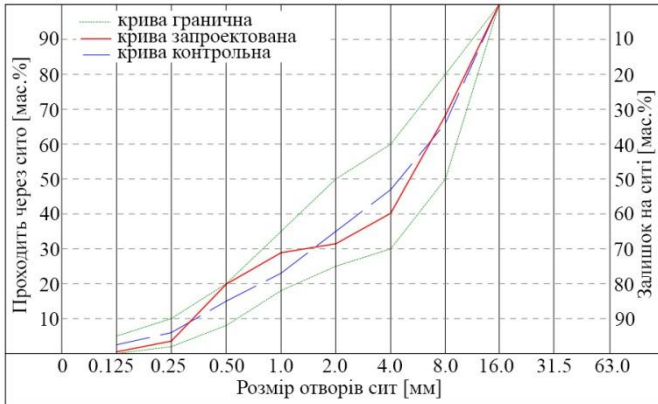


Рис. 1. Запроєктована крива суміші заповнювачів (піску фракцій 0,125–2 мм, щебеню фракцій 2–4 і 4–16 мм)

Для оцінки впливу рецептурних і технологічних факторів було запроєктовано склади бетонних сумішей методом математичного планування експерименту. В якості змінних факторів вибрано витрату СЕМ П/В-М 32.5 R ($X_1=320; 370; 420 \text{ кг/м}^3$) і кількість ПСЕ ($X_2=0; 0,8; 1,6 \text{ мас.}\%$). Для прискорення набирання ранньої міцності до складу бетонів вводили активатор тверднення - натрію сульфат - в кількості 2,0 мас.%. Аналізом отриманих експериментально-статистичних моделей міцності бетонів встановлено, що при збільшенні витрати цементу від 320 до 420 кг/м^3 в бетонній суміші без ПСЕ (ОК=16–18 см) показник В/Ц зменшується від 0,62 до 0,48; при цьому такий бетон характеризується пониженою міцністю в ранньому віці (через 1 добу $R_{ct} = 3,1 \dots 5,8 \text{ МПа}$). В той же час, при введенні 1,0–1,5 мас. % ПСЕ за рахунок суттєвого водоредукуючого ефекту (34–27 %) міцність модифікованого бетону через 1 добу збільшується в 4,6–3,5 рази. Через 2 доби тверднення найвищою міцністю ($f_{c2}=47,0 \text{ МПа}$) характеризується модифікований бетон з витратою цементу 420 кг/м^3 з добавкою 1,6 мас. % ПСЕ. Слід відзначити, що в ранньому віці найбільший приріст міцності (в 1,8–2,0 рази) спостерігається для модифікованого бетону з витратою цементу від 320 до 380 кг/м^3 та ПСЕ – від 0,2 до 1,0 мас.%; при

зростанні витрати цементу від 380 до 420 кг/м³ та РСЕ від 1,2 до 1,6 мас.% приріст міцності бетону зменшується (в 1,1...1,2 рази).

Індикатором зниження емісії CO₂ в бетоні є клінкер-фактор цементу. В той же час, згідно [1] для більш точної оцінки взаємозв'язку між екологічними та технічними характеристиками цементу та бетону визначається ефективність клінкеру в бетоні [кг/(м³ · МПа)], а також інтенсивність виділення CO₂ (CO₂-інтенсивність, кг CO₂/(м³ · МПа)), що характеризує емісію CO₂ в ході виготовлення 1 м³ бетону певної міцності. Характерно, що із збільшенням міцності бетону ці величини зменшуються, тобто портландцементний клінкер використовується більш ефективно. Так, для модифікованого бетону на основі СЕМ II/В-М питома витрата клінкеру на одиницю міцності через 28 діб складає 4,5...3,0 кг/(м³·МПа), при цьому CO₂-інтенсивність рівна 3,9... 2,6 кг CO₂/(м³ · МПа).

Для одержання наномодифікованих швидкотверднучих клінкер-ефективних бетонів визначальним для щільності упаковки зерен є оптимізація гранулометричного складу компонентів з врахуванням наноструктурного рівня. Тому проведено оцінку гранулометричного складу суміші заповнювачів, портландцементу композиційного та наносиліки. За результатами досліджень зернового складу заповнювачів згідно EN 12620 виділено вміст крупної (D>4 мм) та дрібної (D≤4 мм) фракцій, для яких масовий середній діаметр зерен D₅₀ відповідає розмірам 10,1 і 2,8 мм, для піску D₅₀=0,290 мм (рис. 2). В той же час, для портландцементу композиційного та нано-SiO₂ значення D₅₀ відповідають розмірам 11,82 і 0,19 мкм. Методом лазерної дифракції встановлено, що для СЕМ II/В-М 32,5 R середні діаметри за об'ємом D[4;3] та за питомою поверхнею D[3;2] складають відповідно 25,9 і 4,38 мкм; для нано-SiO₂ вказані діаметри зменшуються до 0,209 і 0,200 мкм. Слід відзначити, що для СЕМ II/В-М 32,5 R, що містить 35 мас.% мінеральних добавок, проявляється високодисперсна фракція в області 0,2...1,0 мкм із вмістом 5,4 об.%. Для нано-SiO₂, незважаючи на часткову агломерацію, всі частинки (100,0 об.%) розміщуються в діапазоні до 0,3 мкм.

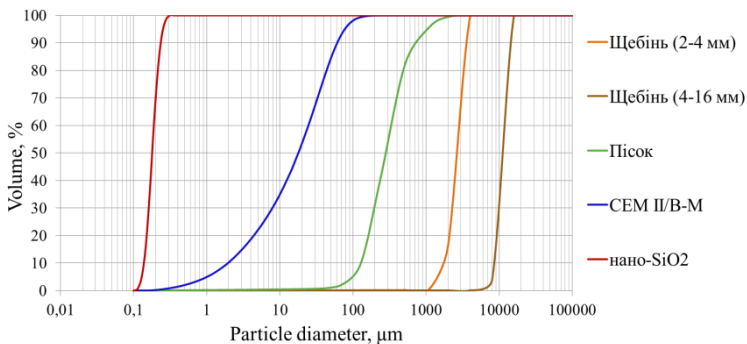


Рис. 2. Інтегральний розподіл зерен основних компонентів клінкер-ефективного бетону

Дослідження впливу суперпластифікатора (PCE), активатора тверднення (Na_2SO_4), наномодифікаторів (нано- SiO_2 та PCE-C-S-H) на технологічні властивості та міцність клінкер-ефективних бетонів проводили на оптимізованому складі суміші компонентів. Витрата матеріалів на 1 м^3 складала: Ц=370 кг, П=407 кг, Ш₂₋₄=527 кг, Ш₄₋₁₆=824 кг; марка консистенції за осіданням конуса – S4. Результатами експериментальних випробувань встановлено, що для бетонної суміші без добавок для досягнення марки за консистенцією S4 водо-цементне відношення складало 0,68, середня густина – 2400 кг/м^3 , вміст повітря – 3,2 %. Як видно з рис. 3, рання міцність через 12 та 24 год становила відповідно 0,8 та 10,2 МПа, а стандартна – 40,5 МПа, що відповідає класу C25/30. При введенні добавки PCE+ Na_2SO_4 досягається водоредукуючий ефект ($\Delta\text{В/Ц} = 40 \%$) із забезпеченням осадки конуса 160 мм ($\rho = 2420 \text{ кг/м}^3$, $V_{\text{п}} = 2,2 \%$). За оцінкою питомої міцності згідно EN 206-1 такий модифікований бетон характеризується середнім її наростанням ($f_{\text{cm}2}/f_{\text{cm}28}=0,39$). Введення комбінованої добавки Na_2SO_4 + нано- SiO_2 + C-S-H-PCE до бетонної суміші ($\text{В/Ц}=0,40$, $\rho = 2410 \text{ кг/м}^3$, $V_{\text{п}}=2,5 \%$) забезпечує приріст ранньої міцності через 12 год – у 8 раз, а через 1 та 2 доби – у 2,3 рази. Для наномодифікованого клінкер-ефективного бетону на основі композиційного портландцементу СЕМ П/В-М з лужно-сульфатною активацією стандартна міцність складає 73,9 МПа, що відповідає класу міцності C50/60. За оцінкою питомої міцності даний наномодифікований клінкер-ефективний бетон відноситься до бетонів із швидким наростанням міцності ($f_{\text{cm}2}/f_{\text{cm}28}=0,51$).

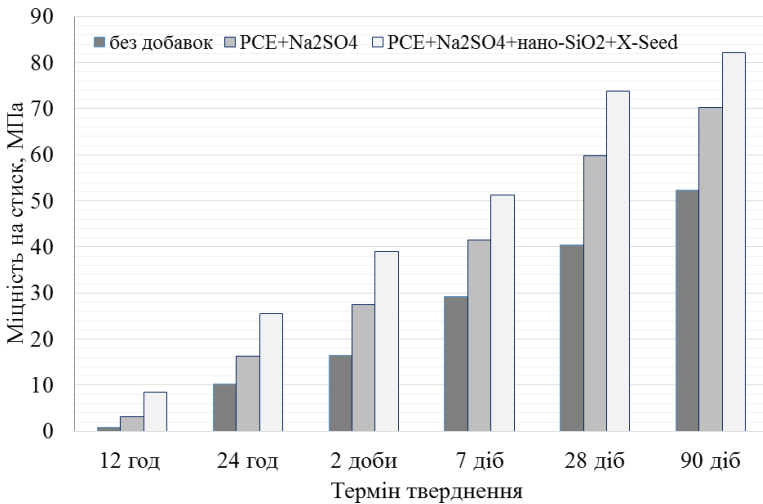


Рис. 3. Міцність модифікованих клінкер-ефективних бетонів

Для наномодифікованих швидкотверднучих клінкер-ефективних бетонів характерне формування щільної контактної зони між крупним заповнювачем і цементуючою матрицею на макро- та нанорівнях, що забезпечує високу міцність контактної зони на границі «матриця-заповнювач». Методом растрової електронної мікроскопії встановлено, що цементуюча матриця бетону без добавок характеризується пористою мікроструктурою зі слабким зчепленням між гідратованими фазами. Наносиліка покращує ефективність цементуючих матеріалів завдяки високій пуцолановій активності та здатності до заповнення капілярних пор. Результати, отримані за допомогою методів SEM та EDX, свідчать, що додавання до цементної пасти наносиліки з високою поверхневою реакційною здатністю покращує мікроструктуру цементуючої матриці бетону. При цьому вилугування іонів кальцію стає значно нижчим, оскільки частинки наносиліки вже в ранньому віці тверднення реагує з гідроксидом кальцію з утворенням додаткових кластерів щільного гелю C-S-H(I) (рис. 4, а, б). У ранній період структуроутворення колювання пор на рівні мікроструктури також відбувається за рахунок введення нано-зародків C-S-H, які утворюють додаткові центри кристалізації гідросилікатів кальцію між зернами цементу та сприяють зшиванню частинок в цементуючій матриці. Завдяки "прискорюючому ефекту" нано-зародків C-S-H та нано-SiO₂ у поєднанні з PCE і лужно-сульфатним активатором (Na₂SO₄) створюється можливість суттєвого збільшення ранньої міцності цементуючої матриці клінкер-ефективних бетонів. При цьому наномодифікування цементуючої матриці надає цементному каменю більш щільний характер з утворенням композиційної зшитої структури на мікро- та нанорозмірному рівнях.

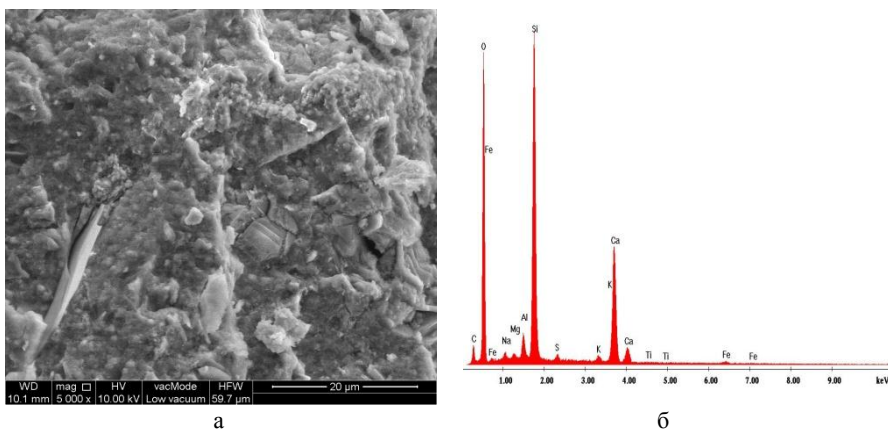


Рис. 4. Мікроструктура (а) та спектр характеристичного рентгенівського випромінювання (б) цементуючої матриці наномодифікованого клінкер-ефективного бетону через 28 днів тверднення

Дослідженнями порової структури встановлено, що наномодифікований бетон характеризується підвищеною кількістю дрібних замкнених пор ($A_{300} = 1,34$), які рівномірно розподілені в структурі цементуючої матриці. При цьому показник Пауерса, який визначає відстань між порами, складає 0,157 мм (норма $\leq 0,2$ мм), що сприяє підвищенню морозостійкості. Для наномодифікованого бетону класу C50/60 призмова міцність становить $f_{c,prism} = 62,5$ МПа, модуль пружності $E_{cm} = 48,4$ ГПа, коефіцієнт Пуасона $\nu = 0,17$; морозостійкість – F300.

Висновок. Оптимізація гранулометричного складу компонентів бетонної суміші на різних структурних рівнях та введення суперпластифікаторів на основі ефіру полікарбоксилату забезпечує щільне упакування зерен, що призводить до зростання міцності таких модифікованих бетонів і підвищення їх клінкер-ефективності. На основі графічної інтерпретації математичних моделей встановлено, що при витраті портландцементу композиційного СЕМ П/В-М 32,5R в межах $350 \dots 380$ кг/м³ та кількості суперпластифікатора PCE 0,8...1,2 мас. % отримуються клінкер-ефективні модифіковані бетони класів C25/30...C35/45 з середнім наростанням питомої міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} = 0,32 \dots 0,39$). Лужна активація та наномодифікування цементуючої матриці клінкер-ефективного бетону дозволяють суттєво збільшити ранню міцність клінкер-ефективного бетону. Введення ультрадисперсних частинок нано-SiO₂ та нанокompозиту C-S-H-PCE забезпечує підвищення показників особливо ранньої міцності бетону ($R_{c12год} = 6,4$ МПа) та одержання бетонів класу C50/60 із швидким наростанням міцності ($f_{cm2}/f_{cm28} = 0,51$). Наномодифікований клінкер-ефективний бетон характеризується дрібними рівномірно розподіленими порами в цементуючій матриці, що визначає підвищену морозостійкість бетону.

1. Schneider, M. The cement industry on the way to low-carbon future / M. Schneider // CCR 124. – 2019. – P. 1–19.
2. Баженов Ю. М. Модифицированные высококачественные бетоны / Ю. М. Баженов, В. С. Демьянова, В. И. Калашников // М.: АСВ. – 2006. – 368 с.
3. Aïtcin, P.-C. Cements of today – concretes of tomorrow / P.-C. Aïtcin, W. Wilson // CWB. – 2014. – P. 349–358.
4. Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone / T. Proske, M. Rezvani, S. Palm, C. Müller, C.-A. Graubner // Cement and Concrete Composites. – 2018. – V. 89. – P. 107–119.
5. Високоміцні швидкоотверднучі бетони та фібробетони: монографія / Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, В.В. Житковський та ін. // Рівне: НУВГП, 2017. – 331 с
6. Дворкін Л.Й. Швидкоотверднучі високоміцні бетони з полікарбоксилатними суперпластифікаторами / Л.Й. Дворкін, Є.М. Бабич, В.В. Житковський // Будівельні матеріали та виробн. – 2017. – № 3–4. – С. 18–21.

7. Pushkarova, K. K. Research of high-strength cement compositions modified by complex organic-silica additives / K. K. Pushkarova, K. O. Kaverin, D. O. Kalantaevsky // *Eastern-european journal of enterprise technologies*. – 2015. – V. 5, Issue 5 (77). – P. 42–51.
8. Sanytsky M., Kropyvnytska T., Gorpynko O., Geviuk I. Effect of the Particle Surface Distribution on the Reactivity of Supplementary Cementitious Materials in Blended Cements. *Book of abstracts ICCS 2019*. – P. 188.
9. Щелочные цементы : монографія / П. В. Кривенко, Р. Ф. Рунова, М. А. Саницький, И. И. Руденко // Київ : «Основа», 2015. – 448 с.
10. Кропивницька Т.П. Концепція еко-ефективних наномодифікованих лужноактивованих композиційних цементів з високою ранньою міцністю / Т. П. Кропивницька // *Вісник НУ «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва*. – 2019. – № 912. – С. 18-23.
11. Krivenko P. The Effect of Nanosilica on the Early Strength of Alkali-Activated Portland Composite Cements / P. Krivenko, M. Sanytsky, T. Kropyvnytska // *Solid State Phenomena*. – 2019. – V. 296. – P. 21–26.
12. Plank J., Schonlein V., Kanhchanason V. Study of the early crystallization of calcium silicate hydrate (C-S-H) in the presence of polykarboxylate superplasticizers. – *Journ. Of Organometallic Chemistry*. – 2018. – Vol. 869. – P. 227-232.

**ФОТОКАТАЛІТИЧНИЙ БЕТОН ЯК МАТЕРІАЛ ДЛЯ «ЗЕЛЕНОГО»
БУДІВНИЦТВА**

**PHOTOCATALYTIC CONCRETE AS A MATERIAL FOR «GREEN
BUILDING»**

Сопов В.П., д.т.н., професор, ORCID: [0000-0001-8050-3932](https://orcid.org/0000-0001-8050-3932), Шишко Н.С., аспірант, ORCID: [0000-0001-9054-9002](https://orcid.org/0000-0001-9054-9002) (Харківський національний університет будівництва та архітектури, м. Харків)

Sopov V.P., doctor of technical sciences, professor, ORCID: [0000-0001-8050-3932](https://orcid.org/0000-0001-8050-3932), Shyshko N.S., postgraduate, ORCID: [0000-0001-9054-9002](https://orcid.org/0000-0001-9054-9002) (Kharkiv National University of Civil Engineering and Architecture, Kharkiv)

Однією з серйозних екологічних проблем є забруднення атмосфери, що негативно впливає на здоров'я населення міст і розвиток негативних явищ і процесів, які погіршують стан навколишнього середовища. Застосування фотокаталітичних бетонів в якості дорожнього покриття, архітектурних оболонок, огорожувальних конструкцій та ін. дозволить за рахунок зміни властивостей поверхні таких матеріалів та використання механізму гетерогенного фотокаталізу очищати будівлі і споруди від бруду, нейтралізувати забруднювачі повітря атмосфери – вихлопні гази, органічні сполуки та ін.

Environmental issues are now receiving particular attention in all fields of life, including construction. The concept of "green" construction implies the maximum reduction of harmful factors at all stages of the life cycle of building materials: from the production of raw materials to the output of final products. As a result of the joint efforts of scientists and industrialists, new building materials are emerging that are characterized not only by the safety of their production and use, but also contribute to the purification of the environment from harmful pollution. Such eco-efficient building materials include concrete, bricks, ceramic tiles, plaster mixtures, paints, glass and other materials containing photocatalysts. Such building materials are commonly called photocatalytic. Photocatalysis is defined as "the change in the speed or excitation of chemical reactions under the action of light in the presence of substances (photocatalysts) that absorb light quanta and participate in chemical transformations of the reaction participants, repeatedly engaging with them in intermediate interactions and regenerating their chemical composition after each cycle of such interactions. ».

Photochemical Catalysts - Substances capable of initiating photocatalysis have a fairly broad nomenclature, but titanium dioxide is mainly used in construction (due to its accessibility and inertness to other components). Under the influence of a light source of ultraviolet or visible light, titanium oxide accelerates the oxidation processes that form the basis of deodorization, antibacterial protection, self-purification and other programs aimed at improving the environment. TiO₂-containing concrete acts as an initiator for the photocatalytic degradation of pollutants such as nitrogen oxides, carbon monoxide, volatile organics, chlorophenols and acetic aldehydes contained in vehicle and plant emissions. Self-cleaning and environmentally friendly concretes are already being produced by several companies and are being used in Europe and Japan.

Ключові слова: «Зелене» будівництво, фотокаталіз, бетон, діоксид титану, оксиди азоту.

Green building, photocatalysis, concrete, titanium dioxide, nitrogen oxide.

Вступ. В даний час екологічним проблемам приділяється особлива увага у всіх сферах життєдіяльності, в тому числі й у будівництві. Концепція «зеленого» будівництва передбачає максимальне зниження генерації шкідливих факторів на всіх стадіях життєвого циклу будівельних матеріалів: від виробництва сировини до виходу кінцевої продукції. В результаті спільних зусиль вчених і промисловців з'являються нові будівельні матеріали, які характеризуються не тільки безпекою свого виробництва і застосування, а й сприяють очищенню навколишнього середовища від шкідливих забруднень. До таких екологічно ефективних будівельних матеріалів відносяться бетон, цегла, керамічні плитки, штукатурні суміші, фарби, скло та інші матеріали, що містять фотокаталізатори. Такі будівельні матеріали прийнято називати фотокаталітичними. Фотохімічні каталізатори – речовини, здатні ініціювати фотокаталіз, мають досить широку номенклатуру, але в будівництві в основному застосовується діоксид титану (завдяки своїй доступності та інертності до інших компонентів). Під впливом джерела світла ультрафіолетового або видимого діапазону діоксид титану прискорює окислювальні процеси, що становлять основу дезодорації, антибактеріального захисту, самоочищення та інших програм, спрямованих на оздоровлення навколишнього середовища.

Діоксид титану (TiO₂) є одним з найбільш часто використовуваних фотокаталітичних з'єднань при розробці інноваційних матеріалів і рішень в різних областях науки і промисловості: катіонне очищення води і повітря, антибактеріальна стерилізація поверхонь, харчова промисловість, косметика та будівельні матеріали [1].

У будівництві діоксид титану був використаний для створення матеріалів (бетони, цементні розчини, облицювальна плитка для зовнішніх робіт, тротуарна плитка, фарби та ін.) з поверхнею, що самоочищається [2]. Широке використання TiO_2 пояснюється його основними функціональними властивостями: висока каталітична ефективність, хімічна стійкість, відносна дешевизна, відсутність токсичності, сумісність з традиційними будівельними матеріалами.

Аналіз досліджень. Бетон з вмістом TiO_2 працює як ініціатор фотокаталітичної деструкції таких забруднюючих речовин, як оксиди азоту, оксид вуглецю, летюча органіка, хлорфеноли і оцтові альдегіди, що містяться у викидах транспортних засобів і підприємств. Бетони, які самі очищаються та очищують навколишнє середовище, вже виробляються декількома компаніями і застосовуються в Європі і Японії. Крім того, дослідження показали, що TiO_2 може прискорити ранню гідратацію портландцементу, поліпшити міцність при стисненні і вигині, підвищити зносостійкість бетону. Також було виявлено, що старіння через карбонізацію може призвести до втрати каталітичної ефективності.

Фотокаталіз активованого ультрафіолетовим опроміненням сонячного світла TiO_2 супроводжується не тільки фотохімічним ефектом. Під впливом ультрафіолетових променів діоксид титану стає супергідрофільним, за рахунок зменшення кута змочування з водою і створення однорідної плівки на оброблюваній поверхні, яка запобігає контакту забруднюючих частинок безпосередньо з поверхнею.

Формування водної плівки на обробленій поверхні і фотокаталітичне видалення забруднюючих речовин представляють реальний ефект самоочищення.

Фотокаталіз – це метод прискорення хімічної реакції за рахунок спільної дії каталізатора та опромінення світлом. В цілому, кінетика фотокаталітичних реакцій має ті ж закономірності, що й каталітичні і фотохімічні реакції. Особливість фотокаталітичних реакцій полягає в тому, що роздільне дія світла або каталізатора не робить впливу на швидкість реакції. Є два види фотокаталізу: гомогенний і гетерогенний.

1. У разі гомогенного фотокаталізу реагенти і фотокаталізатор знаходяться в однакових агрегатних станах. Найбільш частими прикладами фотокаталізаторів в гомогенному фотокаталізі є озон, перехідні оксиди металів та ін.

2. У разі гетерогенного фотокаталізу реагенти і фотокаталізатор знаходяться в різних агрегатних станах. В якості прикладів гетерогенного каталізу можна привести такі процеси, як м'яке і жорстке окислення, дегідрогенізація, перенесення водню, осадження металів, знезараження води, очищення повітря та ін.

За механізмом дії фотокаталітичні реакції можна розділити на 3 типи [3]:

1. Фотоіндукований каталіз. Реакції даного типу протікають за наступною схемою: $A \xrightarrow{h\nu} C; C + S \xrightarrow{h\nu/kT} P$. У цьому випадку при поглинанні енергії фотона $h\nu$ неактивна речовина А (прекурсор), перетворюється на каталізатор С, під дією якого субстрат S перетворюється в продукт Р.

2. Фотоактивований каталіз. Реакції даного типу протікають за схемою: $A \xrightarrow{h\nu} C; C + S \xrightarrow{h\nu/kT} P + A$. Каталізатор С викликає перетворення субстрату S в продукт Р фотохімічним або термічним шляхом, перетворюючись при цьому в А. На відміну від фотоіндукованого каталізу, в даному випадку для повторення циклу потрібен додатковий фотон.

3. Каталітичні фотореакції протікають за наступною схемою: $S \xrightarrow{h\nu} S^*; S^* \xrightarrow{c} P$, тобто фотон поглинається безпосередньо субстратом, що приводить його в збуджений стан. В даному випадку фотоактивації каталізатора не потрібно.

В таких країнах, як Нідерланди і Бельгія, ведуться розробки по використанню гетерогенного фотокаталізу для вирішення різних завдань, зокрема екологічних. В якості фотокаталізаторів можуть використовуватися напівпровідникові оксиди або сульфідів (TiO_2 , ZnO , CdS та ін.), напівпровідникові оксиди з нанесеними металами (наприклад Pt/TiO_2 , $Rh/SrTiO_3$) і напівпровідникові дисперсії з нанесеними оксидами (наприклад RuO_2/TiO_2). Найбільшого поширення набуло використання діоксиду титану в силу його відносної дешевизни та ефективності.

Фотокаталітичні властивості діоксиду титану в анатазній фазі застосовувалися для створення різних матеріалів з середини 1990-х р. [2, 4]. Спочатку більша увага приділялася ефекту створення поверхні, обробленої діоксидом титану, яка самоочищається. Проте в даний час досліджуються можливості застосування діоксиду титану для розкладання органічних і неорганічних речовин на поверхні матеріалу, так званого процесу фотоокислення.

Розглянемо механізм фотохімічного окислення такого забруднювача повітря, як оксид азоту (II) шляхом фотокаталізу за допомогою діоксиду титану. Діоксид титану є напівпровідником. Таким чином, для того, щоб перевести електрони з валентного стану в зону провідності, їм необхідно надати деяку енергію, рівну ширині забороненої зони (рис.1).

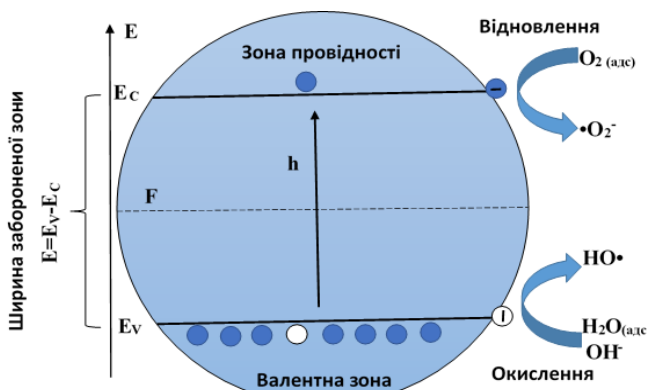


Рис.1. Механізм фотокаталізу

Вираз для фотоактивації діоксиду титану можна записати таким чином:



де $h\nu$ – енергія фотона, e^- – вибитий електрон; p^+ – електрон-дірка. Ширина забороненої зони для діоксиду титану дорівнює приблизно 3,2 еВ.

На поверхні бетону практично завжди присутня вода, що призводить до появи гідроксильних радикалів на поверхні діоксиду титану:



Тоді процес денітрогенізація може бути описаний як двоступенева реакція на поверхні фотокаталізатора:



Аналогічно відбувається процес фотокаталітичного розкладання таких забруднювачів, як СО та деяких органічних сполук.

Одним з недоліків діоксиду титану як фотокаталізатора є його нечутливість до основного мабуть діапазону спектра. Електрони можуть бути переведені з валентної зони в зону провідності тільки фотонами ультрафіолетового спектра діапазону УФ-А (315...390 нм). Кількість таких фотонів в сонячному випромінюванні порівняно невелика і складає близько 5% від сонячної енергії. Тому використання діоксиду титану в чистому вигляді для бетону недоцільно.

Існують різні методи сенсibiliзації діоксиду титану до видимого світла. Зокрема, допування діоксиду титану атомами вуглецю, азоту або сірки призводить до появи спектра поглинання і фотокаталітичної активності у

видимому діапазоні спектра [5]. Після допудвання діоксид титану переходить в новий енергетичний стан з провідністю, близькою до провідності металів.

Таким чином, при розробці складу фотокаталітичного бетону доцільно використовувати допирований діоксид титану в анатазній фазі.

Діоксид титану є дуже ефективним неорганічним фотокаталізатором для видалення деяких органічних і неорганічних полутантов (в основному NO_x) При випромінюванні з довжиною хвилі 360 - 380 нанометрів відбувається генерування електронів в зоні провідності і у валентній зоні. Наступні реакції в присутності води або кисню призводять до утворення поверхневих радикалів. Ті атакують молекули полутантов і тим самим сприяють їх деградації. При опроміненні (наприклад, бетону або розчину) фотоактивним діоксидом титану УФ випромінюванням відбудеться окислення NO_x аж до азотної кислоти. Та у свою чергу взаємодіє з присутнім вуглекислим кальцієм з утворенням нітрату кальцію, який може бути вимитий водою в ґрунт і використаний рослинами, в той час як в атмосфері залишиться виділена вода і вуглекислий газ.

Діоксид титану у природі існує у вигляді трьох поліморфних модифікацій (рис.2 а, б, в).

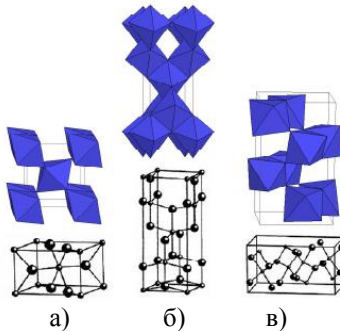


Рис.2. Елементарні комірки Браве TiO_2 рутилу (а), анатазу (б), брукіту (в)

Методи отримання розроблені тільки для діоксиду титану зі структурою рутилу та анатазу.

Діоксид титану - речовина білого кольору, з температурою плавлення 1870°C , не розчинний у воді і кислотах. При нагріванні забарвлюється в жовтий колір, що зникає після охолодження.

Основні властивості діоксиду титану: висока розбілювальна здатність; хороша сумісність з будь-яким плівкоутворювачем; хороша покриваність; висока атмосферо- і вологостійкість; нетоксичність; хімічна стійкість.

Діоксид титану є найбільш поширеним білим пігментом в лакофарбовій промисловості. Він знаходить широке застосування у виробництві поліграфічних фарб, пластичних мас, лінолеуму, гуми та інших матеріалів;

використовується для матування синтетичних і штучних волокон, в радіотехнічній та електронній промисловості, а також у багатьох інших галузях народного господарства. Непігментні сорти діоксиду титану, які містять незначну кількість домішок і для яких не істотні пігментні властивості, застосовуються у виробництві різних титанвміщуючих сплавів (марки «спеціальна» і «легована»), електродів (марки Т-Е), силікатних емалей (марки ТСЕ), спеціальних сортів скла (марки А-Н).

Самоочищення в поєднанні з фотокаталітичним впливом TiO_2 робить його ідеальною добавкою до поверхонь будівельних матеріалів в суворих міських умовах. В залежності від застосування TiO_2 може використовуватися у вигляді покриття, добавки в бетони, гіпс або фарби. TiO_2 може бути використаний для поверхонь елементів мощення або фасадів будинків, підпірних стін, тунелів. При застосуванні TiO_2 в білих цементах поверхня будівлі залишається яскравою протягом тривалого періоду часу; бруд легко змивається в результаті фотокаталізу і впливу гідрофільного середовища.

Фотокаталіз в будівельних матеріалах стали використовувати в кінці 1980-х років. До цього часу було виявлено два важливих ефекта, пов'язаних з характером світлочутливих покриттів з TiO_2 [6,11]:

- ефект самоочищення за рахунок окислювально-відновних реакцій, що викликаються сонячним світлом на поверхні фотокаталізатора;
- фото-індукована гідрофільність поверхні каталізатора, що призводить до підвищення ефекту самоочищення (неорганічні речовини, що викликають утворення бруду і плям на поверхні, можуть бути легко видалені при змочуванні дощовою водою).

Застосування TiO_2 в бетоні спрямоване на досягнення двох основних ефектів – самоочищення від бруду та очищення атмосфери за рахунок окислення оксидів азоту (NO_x).

TiO_2 , як правило, змішують в сухому вигляді з цементом перед додаванням води для гідратації. Після твердіння, TiO_2 присутній у всій структурі цементного каменю. TiO_2 є досить стабільним, високо інертним оксидом. Він не вступає в реакцію з жодною фазою цементу і не бере участі в гідратації. Зі структурної точки зору, він діє як наповнювач пір, знижуючи сумарну пористість на ранній стадії тверднення.

Хоча хімічних реакцій за участю TiO_2 не відбувається, але при введенні води замішування різко змінюється хімія поверхні і електрокінетичні властивості діоксиду титану частинок.

Властивості самоочищення залежать від ефективності окислення органічних молекул. Видимі плями на поверхні будівлі складаються з дрібних частинок і жирних відкладень прив'язаних до поверхні будівлі органічними зв'язуючими речовинами, такими як вуглеводні і жирні кислоти. Молекули жирних кислот тримаються на поверхні будівлі за допомогою хімічного зв'язку їх карбоксильних груп ($-COOH$) з іонами кальцію, наявного

в бетоні. Їх довгі ланцюги зв'язуються з іншими гідрофобними молекулами перпендикулярно до поверхні, в результаті чого вони вловлюють чимало атмосферних частинок і пил. На поверхні що містить фотокаталізатор TiO_2 під впливом ультрафіолетового випромінювання формується великий окислювально-відновний потенціал на основі радикалів кисню, який може розкласти органічні зв'язуючі. Для утворення радикалів OH^\cdot необхідна наявність води і кисню, які містяться в атмосфері. Для активації TiO_2 достатньо тієї складової ультрафіолетового випромінювання, яка міститься у видимому світлі (в середньому складу сонячного випромінювання: $\approx 48\%$ видимого світла, ≈ 44 інфрачервоне світло і $\approx 7 - 8\%$ УФ-випромінювання).

Результати, наведені в європейських дослідженнях вказують, що фотокаталітичний бетон в області розміром з футбольне поле може видалити викиди в еквіваленті приблизно 190 000 автомобілів-км на рік. Випробування показують, що 1 м^2 фотокаталітичного бетону видаляє до 60 мг NO_x в день. Демонстраційні проекти показали, що найкраще зниження рівня забруднення відбувається, коли фотокаталітичний бетон використовується в міських районах, найближчих до джерела забруднення. Фотокаталітичний ефект є більш істотним в частково замкнутих просторах, таких як «каньйон» вулиць [7]. Під час демонстрацій фотокаталітичного бетону наступні фактори зробили боротьбу з забрудненням повітря більш ефективним при:

- інтенсивності світла вище 5 Вт/м^2 ;
- температурі вище 10° C ;
- відносної вологості менше 65% ;
- більш високої концентрації забруднення;
- знаходженні поверхні бетону близько до джерела забруднення;
- напрямі вітру перпендикулярно поверхні бетону;
- пористих характеристиках поверхні.

Забруднення повітря і води, викликане автомобільним рухом, викидами промислових підприємств, використанням у сільському господарстві пестицидів – основні екологічні проблеми. В якості найбільш перспективного каталізатора для видалення органічних забруднювачів був визнаний діоксид титану (TiO_2). Реакція починається з опромінення світлом TiO_2 . Коли TiO_2 поглинає фотон, що містить енергію, рівну або більшу, ніж ширина забороненої зони (рис.1), електрон буде переведений з валентної зони в зону провідності [8]. Активація електронів призводить до генерації «дірок» (електронна вакансія) у валентній зоні. У цій реакції, H^\cdot і e^\cdot потужні агенти, що окислюють і відновлюють, відповідно. Електронно-діркові пари можуть рекомбінувати протягом короткого часу або брати участь у хімічних реакціях залежно від умов реакції і молекулярних структур напівпровідників.

Сильна окислювальна здатність H^\cdot дозволяє йому реагувати з водою, щоб генерувати дуже активний радикал гідроксилу (OH^\cdot), який також є потужним окислювачем. Більшість органічних забруднювачів повітря може

бути повністю перетворено гідроксильними радикалами або дірками в нешкідливі кінцеві продукти (наприклад, CO_2 і H_2O). Крім того, скорочення потужності електронів може викликати перехід молекулярного кисню (O_2) до супероксиду (O_2^-). Було підтверджено, що супероксид майже так само ефективний, як дірки і гідроксильні радикали в ланцюгових реакціях руйнування органічних сполук.

Каталітична активність діоксиду титану зростає зі зменшенням розміру його частинок, так як при цьому збільшується відношення поверхні частинок до їх об'єму. Тому наночастинки титану стають дуже ефективними, і їх використовують для очищення води, повітря і різних поверхонь від органічних сполук, які, як правило, шкідливі для людини [9].

Нанесена на скло плівка з наночасток діоксиду титана прозора і непомітна для ока. Однак таке скло під дією сонячного світла здатне самоочищатися від органічних забруднень, перетворюючи будь-яку органічний бруд у вуглекислий газ і воду. Скло, оброблене частинками діоксиду титана, позбавлене жирних плям і тому добре змочується водою. В результаті, таке скло менше пінтіє, так як крапельки води відразу розпластуються уздовж поверхні скла, утворюють тонку прозору плівку [10].

Фотокаталізатори, виготовлені на основі наночасток діоксиду титану можна включати до складу бетону автомобільних доріг. Досліди показують, що при експлуатації таких доріг концентрація монооксиду азоту набагато нижче, ніж над звичайними. Таким чином, включення наночастинок діоксиду титану до складу бетону може поліпшити екологію навколо автомобільних доріг [12].

Висновок. Таким чином, використання діоксиду титану дозволить значно покращити екологічну ситуацію великих міст в частині очищення поверхонь від бруду і пилу і очищення повітря від органічних сполук і NO_x .

1. Malato S. Decontamination and disinfection of water by solar photocatalysis: recent overview and trends / S. Malato, P. Fernández-Ibáñez, M.I. Maldonado, J. Blanco, W. Gernjak // *Catalysis Today*, – 2009. – vol. 147, no. 1. – P. 1–59.
2. Fujishima A. TiO_2 Photocatalysis: Fundamentals and Application / A. Fujishima, K. Hashimoto and T. Watanabe // 1 edn., ВКС, Tokyo, 1999.
3. Ляпидевская О.Б. Фотокаталитический бетон для дорожного строительства / О.Б. Ляпидевская, М.А. Фрайнт // *Вестник МГСУ*, – 2014. – № 2, С. 125—130.
Lyapidevskaya O.B. Fotokataliticheskij beton dlya dorozhnogo stroitelstva / O.B. Lyapidevskaya, M.A. Frajnt // *Vestnik MGSU*, – 2014. – № 2, P. 125—130.
4. Wang R. Light-Induced Amphiphilic Surfaces / R. Wang, K. Hashimoto, A. Fujishima, M. Chikuni, E. Kojima, K. Kitamura, M. Shimohigoshi and T. Watanabe // *Nature*, – 1997. – 338, P. 431–432.
5. Zainullina V.M. Electronic structure and optical properties of anatase doped with bismuth and carbon / V.M. Zainullina, V.P. Zhukov // *Phys. Solid State*, – 2013. Vol. 55, No. 3, pp. 534–541.

- 6.** Irie H. Photo-induced Wettability Control on TiO Surface / H. Irie, S. P. Tee, T. Shibata and K. Hashimoto // *Electrochem, Solid-State Lett.*, – 2005. – 8. – P. 23- 25.
- 7.** Maggos T., Plassais A., Bartzis J., Vasilakos C., Moussiopoulos N., Bonafous L. Photocatalytic degradation of NOx in a pilot street canyon configuration using TiO₂-mortar panels. 5th International conference on urbain air quality: 2005: Picada section, 29-31 March 2005. Valencia, Spain, 2005.(6)
- 8.** Sopyan I. An efficient TiO₂ thin-film photocatalyst: photocatalytic properties in gas-phase acetaldehyde degradation / I. Sopyan, M. Watanabe, S. Murasawa, K. Hashimoto, A. Fujishima // *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, – 1996. – 98, P. 79-86.
- 9.** Санчез Ф., Соболев К. Нанотехнологии в производстве бетонов. / Ф. Санчез, К. Соболев // *Вестник ТГАСУ*, – 2013. – № 3, – С. 262-289.
Sanchez F., Sobolev K. Nanotehnologii v proizvodstve betonov. / F. Sanchez, K. Sobolev // *Vestnik TGASU*, – 2013. – № 3, – P. 262-289.
- 10.** Folli A. Rhodamine B Discolouration on TiO₂ in the Cement Environment: A Look at Fundamental Aspects of the Self-cleaning Effect in Concretes / A. Folli, U. H. Jakobsen, G. L. Guerrini, D. E. Macphee // *J. Adv. Oxid. Technol.* – 2009. – Vol. 12, – No. 1, – pp.126-133
- 11** Shintre S.N. Environmental Applications of Nanocrystalline TiO₂ in Combination with H₂O / S.N. Shintre, P.R. Thakur // *International Journal of Green Nanotechnology*. – 2012. – Vol. 4, – No. 4, – P. 430-439.
- 12.** Boonen E. Photocatalytic roads: from lab tests to real scale applications / E Boonen, A. Beeldens // *European Transport Research. Review*, – 2013. – Vol. 5, – P. 79-89

УДК 624:131.22

**НАУКОВО-ТЕХНІЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ВИКОРИСТАННЯ
МІНЕРАЛЬНИХ ДИСПЕРСНИХ СИСТЕМ ТЕХНОГЕННОГО
ПОХОДЖЕННЯ**

**SCIENTIFIC AND TECHNICAL JUSTIFICATION OF USE OF MINERAL
DISPERSE SYSTEMS OF TECHNOGENIC ORIGIN**

**Сторчай Н. С., д.т.н., доц., Савін Ю. Л., к.т.н., доц., Волнянська І. П., ст.
викл. ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та
архітектури»**

**Storchai N. S., Dr. Sc. (Tech.), Assoc. Prof. , Savin Yu. L., Ph.D., Assoc. Prof. ,
Volnianska I. P., Assoc. Prof. PHEI «Prydniprovaska State Academy of Civil
Engineering and Architecture»**

**В статті розглянуто фізико-хімічну основу цементних клінкерів,
модифікованих мінерально-дисперсними системами техногенного
походження, що містять цінні елементи та комбінації.**

**The physical-chemical basis of the cement clinkers modified by mineral
disperse systems of technogenic origin containing of valuable elements and
combinations based on them are considered in this article.**

**As a result of the studies, Portland cement clinker was obtained using the
waste data. The introduction of these mineral dispersion systems into the
feedstock composition helps to reduce the firing temperature of the clinker by
40° C. Due to the scientifically substantiated involvement of mineral dispersed
systems of anthropogenic origin containing valuable elements and compounds
based on them, regulation of the properties of building materials may be
directed. Partial replacement in the raw material mixture of the clay
component with the waste allows to expand the raw material base to obtain
Portland cement clinker, to effectively influence the technological process of
firing.**

Ключові слова: модифікація, *s-p-d*-елементи, техногенні відходи,
мінеральні системи
Modification, s-p-d-elements, man-made wastes, mineral systems

Вступ. Одним з напрямків зниження сумарних витрат на виробництво
будівельних матеріалів, і підвищення конкурентноздатності продукції є
регулювання фізико-хімічними процесами формування структури і

поліпшення властивостей будівельних матеріалів шляхом їх модифікації різними речовинами. В якості речовин, що ефективно впливають на параметри технологічних процесів при структуроутворенні в'язучих, розчинів і бетонів можуть застосовуватися мінеральні дисперсні системи техногенного походження. Означені тенденції, як в світовому, так і у вітчизняному виробництві будівельних матеріалів, зумовлюють розширення сировинної бази за рахунок застосування різних вторинних продуктів промисловості, що дозволяє знизити енергоємність технологічних процесів і собівартість продукції.

До таких матеріалів можна віднести великотоннажні відходи Вільногірського гірничо-металургійного комбінату (ВГМК).

Актуальність проблеми. Розробка теоретичних основ модифікації будівельних матеріалів за рахунок реалізації ефективної дії мінеральних дисперсних систем техногенного походження, є **актуальною проблемою**. Рішення даної проблеми має велике науково-практичне значення, що дозволяє розширити уявлення про зміну структури і властивостей в модифікованих цементних системах, розчинах і бетонах, що дозволить розширити сировинну базу для виробництва будівельних матеріалів і сприятиме екологічному оздоровленню навколишнього середовища.

Основна частина. В рамках вирішення даної проблеми, з метою поліпшення властивостей в'язучих і бетонів в наших дослідженнях використовувалися мінеральні дисперсні системи техногенного походження. Дані системи представляють інтерес з точки зору вмісту цінних елементів періодичної системи Д.І. Менделєєва і з'єднань на їх основі.

До характерних сполук на основі *p*-елементів відносяться сполуки алюмінію, кремнію. Оксиди Al_2O_3 і SiO_2 є основними складовими портландцементного клінкеру і багатьох керамічних матеріалів. Так, хімізм процесу клінкероутворення полягає у взаємодії основного CaO і кислих оксидів (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2).

Кремній відноситься до четвертої групи періодичної системи елементів Д.І. Менделєєва і за своїми властивостями є типовим представником цієї групи елементів [1]. Властивості кремнію, визначаються розташуванням електронів на зовнішній орбіті. Зі сполук кремнію найбільш стійкі двоокис кремнію – кремнезем і утворені силікати.

Важливе значення має кремній при виробництві силікатів, прикладом можуть служити дво- і трикомпонентні системи з утворенням твердих розчинів.

Так система $CaO - SiO_2$ грає важливу роль у формуванні фазового складу цементів, доломітових вогнетривів. Відповідно до системи $Al_2O_3 - SiO_2$, зміст SiO_2 робить основний вплив на процеси випалу аломосилікатних матеріалів. У трьох- і чотирьохкомпонентних системах SiO_2 є обов'язковим

компонентом, що впливає на властивості системи. Таке ж значення мають сполуки *p*-елементів на основі алюмінію.

Вельми цікаві, з точки зору фізичної хімії силікатів, сполуки на основі *d*-елементів. До них відносять сполуки заліза, марганцю, титану, цирконію, гафнії, та ін. Ці елементи характеризуються тим, що у них відбувається заповнення предзовнішнього *d*-шару від 1 до 10. Зокрема, титан, цирконій, гафній, добудовують *d*-підрівень і характеризуються таким зовнішнім будовою: титан ($3d^24s^2$); цирконій ($4d^25s^2$), гафній ($5d^26s^2$).

Так *d*-елемент залізо та *p*-елемент алюміній в клінкерному розплаві, завдяки амфотерності, в залежності від умов існують у вигляді комплексів з четвертній $[\text{MeO}_4]^{5-}$ або шестерній $[\text{MeO}_4]^{9-}$ координацією. У четвертній координації вони проявляють кислотні, а в шестерній - основні властивості [2].

Зв'язок $\text{Me} = 0$ значно сильніше в четвертній координації, тому $[\text{MeO}_4]^{5-}$ переміщається в розплаві в недисоційованому вигляді, а комплекс $[\text{MeO}_4]^{9-}$ дисоціює на Me^{3+} і 6O^{2-} , що володіють високою рухливістю. У розплаві існує кислотно-основна рівновага.

При збільшенні вмісту лужних і лужноземельних елементів в розплаві збільшується кількість малорухомих комплексів $[\text{MeO}_4]^{5-}$, отже, підвищується в'язкість розплаву, сповільнюється процес масопереносу, знижується коефіцієнт дифузії.

Зі збільшенням кількості сполук *p*-елементів відбувається дисоціація частини комплексів $[\text{MeO}_4]^{5-}$, в'язкість розплаву знижується, інтенсифікуються процеси масопереносу, підвищується коефіцієнт дифузії, відповідно, підвищується ступінь засвоєння вапна і повніше протікає процес алітоутворення.

Зі збільшенням вмісту сполук *d*-елементів (залізо), глиноземистий модуль зменшується і збільшується кількість розплаву.

Лужні елементи, в загальному, збільшують кількість розплавленої фази і впливають позитивно на процес алітоутворення. Але їх вміст не може перевищувати 0,3%.

Збільшення глиноземного модуля призводить до підвищення в'язкості. З ростом електронегативності поверхневий натяг підвищується, а вміст *p*-елементів падає.

Підгрупа титану включає елементи титан, цирконій і гафній. За поширеністю в природі на першому місці стоїть титан, вміст якого в земній корі становить 0,61 мас. %. Головними мінералами титану є титаномagnetити FeTiO_3 · $n\text{Fe}_3\text{O}_4$ і рутил TiO_2 . Атоми елементів підгрупи титану містять на зовнішньому енергетичному рівні по два електрона, а два інших перебувають на *d*-підрівні, сусіднього з зовнішнім. Мале число електронів на зовнішньому рівні обумовлює типові металеві властивості цих елементів. На їх поверхні легко утворюються щільні оксидні плівки, внаслідок чого при звичайних

умовах вони стійкі по відношенню до повітря, води і багатьох агресивних середовищ.

У сполуках елементи підгрупи титану можуть проявляти ступінь окислення +2, +3, +4, але сполуки нижчих ступенів окислення мало стійкі, вони легко окислюються вже киснем повітря. Стійкість сполук нижчих ступенів окислення зменшується в ряді: Ti – Zr – Hf. У всіх найважливіших з'єднаннях титан, цирконій, гафній виявляють ступінь окислення +4.

d-елементи відрізняються від інших елементів різноманіттям валентних станів. Через те, що в міру просування вниз по підгрупі, видалення електрона з *d*-підрівня стає все більш легким, виявляється підвищення максимальних значень валентних станів.

Всі *d*-елементи – відновники. Відновлювальна здатність визначається як будовою електронних конфігурацій, так і розмірами іонів. Стандартний відновний потенціал залежить від енергії іонізації та ентальпії, гідратації іона, яка в свою чергу залежить від радіуса іона.

Розглядаючи можливість модифікації необхідно враховувати безліч факторів, що впливають на технологічний процес.

Утворення кінцевого продукту складається з певного числа перетворень сировинних матеріалів, розділених на певні стадії і операції.

Використання мінеральних дисперсних систем техногенного походження в якості сировинних матеріалів або модифікаторів дозволяє скоротити якусь кількість операцій і якщо це ще й операції, пов'язані з високими енергетичними затратами, то техніко-економічна ефективність виробництва зростає багаторазово. Крім того, розширюється сировинна база, і поліпшуються екологічні умови.

Детальне вивчення фізико-хімічних властивостей вторинних продуктів ВГМК показало на присутність в їх складі сполук на основі *p* і *d*-елементів, що вимагає науково-методичного підходу в технології виробництва цементних клінкерів, і на їх основі різних бетонів, будівельних розчинів.

Були проведені дослідження щодо впливу *d*-елементів відходів збагачення ільменітової руди ВГМК на структуру і властивості мінералів портландцементного клінкеру, випалювальні властивості та їх гідравлічну активність.

Одним з мінералів портландцементного клінкеру є двокальцієвий силікат (C_2S), який багато в чому визначає найважливіші властивості портландцементу. При помірному охолодженні β - C_2S переходить в γ - C_2S , що пояснює зниження гідравлічної активності, а збереження β -, α' -, α -модифікації C_2S можна здійснювати за рахунок різних стабілізуючих добавок або спеціальних технологій. Домішкові елементи з метою зміни ентропії кристалічної решітки мінералу повинні значно відрізнятися від основних атомів решітки.

Введення до складу сировинної суміші мінеральних дисперсних систем техногенного походження, які в своєму складі мають *d*-елементи (Fe^{2+} , Mn^{2+}), що ізоморфно заміщають Ca^{2+} , дозволяє стабілізувати високотемпературні модифікації $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$.

Домішки, які утворюють ізоморфні тверді розчини впровадження, викликають значне збільшення ентропії $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, це пояснюється тим, що V^{5+} , Cr^{6+} , Mn^{6+} , значно відрізняється від іонів Ca^{2+} і Si^{4+} і не можуть рівноцінно заміщати їх у структурі C_2S . Вони мають малу розчинність і стабілізують метастабільну модифікацію $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$.

В результаті проведених досліджень було отримано портландцементний клінкер з використанням даних відходів [3, 4]. Введення даних мінеральних дисперсних систем в сировинний склад сприяє зниженню на 40°C температури випалу клінкеру. Цементи, отримані на основі даних клінкерів, із застосуванням відходів збагачення ільменітової руди Вільногірського гірничо-металургійного комбінату, що містять сполуки *d*-елементів, за своїми властивостями відповідають типу цементів II, їх основні характеристики представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-механічні властивості цементів

№ цементу	R_{008} , ваг. %	$S_{уд}$, м ² /кг	НГ, %	Терміни схоплювання година. - хв.		Межа міцності при стисненні, МПа, у віці, діб.		
				початок	кінець	2	7	28
Без добавок	10,4	382	28,5	2 – 40	5 – 20	24,4	46,7	75,8
З добавками	11,2	376	29,0	3 – 00	5 – 40	26,2	45,9	74,2

Висновок. За рахунок науково-обґрунтованого залучення мінеральних дисперсних систем техногенного походження, що містять цінні елементи та сполуки на їх основі, можливо направлено регулювання властивостями будівельних матеріалів. Часткова заміна в сировинній суміші глиняного компонента відходами ВГМК дозволяє розширити сировинну базу для отримання портландцементного клінкеру, ефективно впливати на технологічний процес випалу.

1. Евстроньев К.С. Химия кремния и физическая химия силикатов / К.С. Евстроньев, Н.А. Торопов. – М.: Госстройиздат, 1956. – 340 с.

2. Пашенко А.А. Вяжущие материалы / Пашенко А.А., Сербин В.П., Старческая Е.А. – К.: Вища школа, 1985. – 440 с.

3. Приходько А.П. Фізико-хімічні основи виробництва модифікованих цементів, бетонів / В.І. Большаков, А.П. Приходько, Л.С. Савін, А.А. Салей, Ю.Л.

Савін, Н.С. Сторчай // Сборник научных трудов. Строительство, материаловедение, машиностроение. Выпуск 47 «Инновационные технологии жизненного цикла объектов жилищно-гражданского, промышленного и транспортного назначения» – Дн-ск: ПГАСА, 2008. – С. 129–140.

4. Пат. № 34907 Украина, МПК С 07С 7/00. Сировинна суміш для отримання поргладцементного клінкеру / Большаков В. І., Приходько А.П., Савин Ю. Л., Савин Л. С., Баранов Ю. Д. Лисенко С.В., Шматков Г.Г.; заявитель и патентообладатель Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры. – № u 2008 04169; заявл. 02.04.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. № 16.

1. Evstronev K.S. Himiya kremniya i fizicheskaya himiya silikatov / K.S. Evstronev, N.A. Toropov. – М.: Gosstroyizdat, 1956. – 340 s.

2. Paschenko A.A. Vyazhuschie materialyi / Paschenko A.A., Serbin V.P., Starcheskaya E.A. – К.: Vischa shkola, 1985. – 440 s.

3. Prihodko A.P. Fiziko-himichni osnovi virobnitstva modifikovanih tsementiv, betoniv / V.I. Bolshakov, A.P. Prihodko, L.S. Savin, A.A. Saley, Yu.L. Savin, N.S. Storchay // Sbornik nauchnyih trudov. Stroitelstvo, materialovedenie, mashinostroenie. Vyipusk 47 «Innovatsionnyie tehnologii zhiznennogo tsikla ob'ektov zhilischno-grazhdanskogo, promyishlennogo i transportnogo naznacheniya» – Dn-sk: PGASA, 2008. – S. 129–140.

4. Пат. № 34907 Украина, МПК S 07S 7/00. Сировинна суміш для отримання портландцементного клінкеру / Bolshakov V. I., Prihodko A.P., Savin Yu. L., Savin L. S., Baranov Yu. D. Lisenko S.V., Shmatkov G.G.; заявитель и патентообладатель Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры. – № u 2008 04169; заявл. 02.04.2008; опубл. 26.08.2008. Бюл. # 16.

УДК 691.32

СПЕЦІАЛЬНІ БЕТОНИ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНОГО БУДІВНИЦТВА

SPECIAL CONCRETE FOR ENERGY CONSTRUCTION

Шейніч Л.О., д.т.н., проф., ORCID: 0000-0002-7684-9495,

Миколаєць М.Г., к.т.н., ORCID: 0000-0002-8823-3401,

Крилов Є.О., ORCID ID: 0000-0001-7944-2132,

Мудрик М.С., ORCID ID: 0000-0001-7391-7723.

Державне підприємство «Державний науково-дослідний інститут будівельних конструкцій», м. Київ

Sheinich L., Doctor of Technical Sciences, Professor,

ORCID: 0000-0002-7684-9495,

Mykolalets M., PhD, Head of Laboratory, ORCID: 0000-0002-8823-3401,

Krylov E., ORCID ID: 0000-0001-7944-2132,

Mudryk M., ORCID ID: 0000-0001-7391-7723.

Department of Reinforced Concrete Structure Manufacturing Technology State Enterprise "State Research Institute of Building Construction, Kyiv

Проведено аналіз сировинних матеріалів вітчизняного виробництва для виготовлення спеціальних бетонів із середньою густиною понад 2500 кг/м³. Визначено фізичні та фізико-механічні характеристики відібраної сировини для наведених бетонів. Розроблені рецептури спеціального бетону для енергетичного будівництва з підвищеною середньою густиною.

This paper consider the analysis of raw materials available in the market of Ukraine for production of special concretes for energy construction with an average density of more than 2500 kg / m³. The main criteria to obtain the concrete were increased heat resistance, high radiation resistance and average density. Concretes were obtained from the mixture with a cone sediment of 2.5-8.0 cm and cement of the second type with a maximum heat release up to 290 kJ / kg on the 7th day, a concrete strength being not less than 28 MPa on the 28th day and with a C₃A content of not more than 8 %, the maximum content of the sum of C₃S + C₃A should not exceed 58%, the maximum content of alkalis in terms of Na₂O should not exceed 0.6%. The most suitable filler that has a higher average density is basalt chipping. The maximum operating temperature of concrete with aggregate of basalt deposit is 300 °C. Physical and physical and mechanical characteristics of raw materials are determined. The advantages of some raw materials in comparison with the

other ones are established. Recipes of special concretes with the use of raw materials such as basalt chipping, granite crushed stone, river sand, natural sand, iron ore concentrate, colloidal silica, fly ash have been developed in different combinations and proportions. Several recipes of special concrete with high average density from 2545 to 2655 kg / m³ and compressive strength from 54.6 MPa to 70,6 MPa have been developed. As a result of the research, the concrete composition was selected so that the established requirements such as average density from 2545 to 2655 kg / m³ and compressive strength of 54.6 MPa were most fully met

Ключові слова: Базальт, бетон, густина, добавка, заповнювач, спеціальний, термостійкість.

Basalt, concrete, density, additive, aggregate, special, heat resistance.

Вступ. Широке використання атомної енергетики, розвиток радіохімічних виробничих потужностей, будівництво котельень, повітроводів і т.п. створюють необхідність розробки ефективних радіаційно захисних і термостійких матеріалів. Такими матеріалами можуть бути спеціальні бетони, що виготовляються на основі сировини вітчизняного виробництва.

Аналіз джерел. Згідно з роботами Шейніча Л.О., Пługіна А.Н. [1, 2], а також згідно з даними [3-5] спеціальні бетони для енергетичного будівництва, отримані за традиційними технологіями на основі рядових портландцементів та заповнювачів характеризуються не достатньо високими спеціальними властивостями. Спеціальні бетони повинні мати високий вміст хімічно зв'язаної води при температурах 300-500 °С, характеризуватися підвищеною термостійкістю та меншою усадочною деформацією.

В наукових дослідженнях, при підборі складу бетону, були використані положення, що розроблені професором Дворкіним Л.І. [6, 7].

Мета та задачі досліджень. Основною задачею досліджень було виготовлення бетону зі спеціальними властивостями, на основі сировини українського виробництва, який би був термічно- та радіаційностійким.

Методика та результати досліджень. При проектуванні складу бетону необхідно було дотримуватись наступних технічних характеристик:

- Середня густина - більше 2500 кг/м³,
- Міцність при стиску - не менше 32 МПа,
- Застосування цементу другого типу з максимальним тепловиділенням 290 кДж/кг на 7-му добу і міцністю не менше 28 МПа на 28 добу тверднення. Вміст С₃А - не більше 8%, максимальний вміст суми мінералів С₃S+С₃А не повинен перевищувати 58%. Максимальний вміст лугів в перерахунку на Na₂O не більше 0,6%.

- В якості заповнювачів можуть використовуватися вапняк, мармур, базальт, граніт, габро або ріоліт.

- Рухливість бетонної суміші - від 2,5 до 8,0 см.
- Максимальне значення водоцементного відношення - 0,5.
- Вода для приготування бетонної суміші повинна задовольняти [8].

Згідно [9, 10] максимальна середня густина звичайних важких бетонів складає 2500 кг/м^3 . Для отримання зазначених бетонів, зазвичай, використовують в якості заповнювача щебінь гранітний та пісок кварцовий. Середня густина такого щебеню коливається від 1400 до 1470 кг/м^3 , а істинна густина складає приблизно $2,60 \text{ г/см}^3$. Відповідні характеристики піску - (1500 - 1600) кг/м^3 та $2,61 \text{ г/см}^3$. Такі показники щебеню гранітного і піску кварцового дозволяють отримати практично граничні значення бетону за густиною - до 2500 кг/м^3 . Допустимий інтервал коливання середньої густини звичайного важкого бетону, згідно [9], знаходиться в межах (2483 - 2500) кг/м^3 . Таким чином, допускається коливання середньої густини бетону $\pm 8,5 \text{ кг/м}^3$. Зазначене обмеження коливання середньої густини менше точності дозування сировинних матеріалів. Тому, для отримання спеціальних бетонів необхідно використовувати більш важкі заповнювачі.

Найбільш придатним заповнювачем, що має вищу середню густиною є базальтовий щебінь. Інші заповнювачі, застосування яких не суперечить вихідним даним, мають меншу густиною або в промислових масштабах в Україні не виготовляються. Базальтовий щебінь і пісок в промислових масштабах виготовляється на ПрАТ «Івано-Долинський спецкар'єр». Середня насипна густина складає 1250 кг/м^3 , істинна - $2,85 \text{ г/см}^3$. Лещадність зерен щебеню - 35 %. Марка щебеню за міцністю - 1200.

Середня густина шматків породи або зерен базальтового щебеню складає 2800 кг/м^3 , що на 10 % вище, ніж густина гранітного щебеню. Це дозволило отримати бетони із середньою густиною більше 2500 кг/м^3 . На ПрАТ «Івано-Долинський спецкар'єр» виробляють базальтові заповнювачі наступних фракцій: 0,1-1,2 мм; 1,2-2,5 мм; 2,5-5 мм; 5-20 мм; 20-40 мм. Наведені показники середньої густини бетону і фракційного складу заповнювачів задовольняють вимогам вихідних даних. В якості дрібного заповнювача запропоновано пісок природний виробництва ПрАТ «Микитівський гранітний кар'єр», який відповідає вимогам згідно [11]. Для регулювання гранулометричного складу дрібного заповнювача можливе застосування піску річкового Дніпровського. Для регулювання і підвищення значення середньої густини бетону можливе введення в його склад невеликої кількості залізорудних матеріалів, що мають досить високу істинну густиною до 7000 кг/м^3 , наприклад, залізорудний концентрат згідно [12].

Максимальна температура застосування бетонів на заповнювачах базальтового родовища складає 300°C згідно [13].

Заповнювачі, що застосовуються в рецептурі, мають відповідати вимогам стандарту і не містити у своєму складі пиловидних та глинистих часток, а також глини у грудках згідно [14].

Для виготовлення спеціальних бетонів проаналізували можливість застосування портландцементу нормованого складу ПЦ І М500, згідно [15], виробництва ТОВ «Волинь-цемент». Вибір вищенаведеного портландцементу зумовлений тим, що такий цемент має найнижче тепловиділення серед портландцементів інших виробників [16]. Величина тепловиділення на 7-му добу складає 167 кДж/кг. В той же час цей цемент не може бути використаний, оскільки сума мінералів цементного клінкеру C_3S+C_2S перевищує 58%. Оскільки бездобавочні портландцементи нижчих марок в Україні не виробляються, тому в подальших дослідженнях використовували цементи із додаванням доменного шлаку – цемент М400 типу ПЦ ІІ/А-Ш [15]. Характеристики портландцементу марки ПЦ ІІ/А-Ш М400 наведені у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики ПЦ ІІ/А-Ш М400

Назва показників	Одиниця виміру	Нормативні вимоги ДСТУ Б В.2.7-46	Фактичне значення
ПЦ ІІ / А – Ш – 400 Р - Н			
Нормальна густина цементного тіста (НГЦТ)	%	23-28	25,0
Істинна густина	г/см ³	3,0-3,2	3,0
Терміни тужавлення:			
- початок	хвилин	не раніше 60 хв.	110
- закінчення	хвилин	не пізніше 10 год	140
Міцність при стиску на 2 добу		15,0	21,7
Міцність при стиску на 7 добу	МПа	---	33,0
Міцність при стиску на 28добу		40,0	43,5
Міцність при згині на 28 добу	МПа	---	4,2

Підбір складу спеціальних бетонів.

При моделюванні складів бетонів керувались наступними принципами:

1. Для зменшення тепловиділення бетонної суміші в ранні терміни тверднення та підвищення корозійної стійкості бетону передбачено можливість застосування золи-винесення ТЕС, згідно [16].

2. Бетон повинен мати міцність при стиску при випробуванні зразків-кубів не менше 32 МПа.

3. Заповнювачі повинні відповідати вимогам [4, 11]. У випадку перевищення в них вмісту глинистих або пилюватих часток, їх необхідно промивати.

4. Дозування сировинних компонентів бетонної суміші виконувати за масою з похибкою: в'яжуче, вода, робочий розчин рідкої хімічної добавки

$\pm 1\%$, заповнювач $\pm 2\%$. У випадку застосування вологих заповнювачів необхідно враховувати у них вміст води.

5. Послідовність завантаження компонентів бетонної суміші при працюючому бетонозмішувачі – 10 % щебеню, 10 % води від встановленої кількості. Потім завантажуються пісок, цемент, зола-винесення, за потреби залізорудний концентрат. Після цього завантажується решта води, щебеню, хімічні добавки. Тривалість перемішування – 2 хвилини до отримання однорідної маси.

6. Після перемішування та отримання однорідної бетонної суміші її марка за легкоукладальністю має бути P1 - P2 згідно [18].

7. Життєздатність бетонної суміші повинна бути не менше 1,0 год.

Підбір складу радіаційно-захисного бетону почали із застосуванням гранітного щебеню фракції 5-10 та 10-20 та піску річкового з модулем крупності 1,33. Цей склад в подальших дослідженнях був контрольним.

Для збільшення середньої густини бетону був використаний щебінь базальтовий крупної фракції 20-40 мм та пісок з модулем крупності 2,51 (ПрАТ «Микитівський гранітний кар'єр»). Отримана бетонна суміш із застосуванням базальтового щебеню фракції 20-40 мм погано ущільнювалася, але отриманий бетон мав більшу середню густину, ніж на гранітному щебені. Бетонна суміш характеризувалася неоднорідністю та поганою легкоукладальністю. Тому від складу бетону, на базальтовому щебені з додаванням фракції 20-40 мм, в подальших дослідженнях відмовилися. А пісок природний з модулем крупності 2,51 замінили на пісок річковий з модулем крупності 1,33.

Криву розсіву оптимальної суміші заповнювачів наведено на рисунку 1.

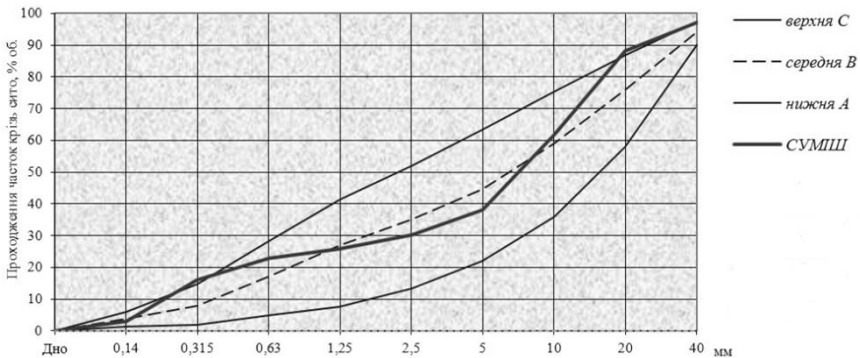


Рис.1. Крива розсіву суміші заповнювачів

Для зміни характеристик бетонної суміші та бетону вводили інші складові: хімічні добавки-пластифікатори на основі лігносульфонату та полікарбоксилатів, колоїдний кремнезем, зола-винесення ТЕС (м. Ладижин), залізорудний концентрат виробництва ПрАТ «Північний гірничо-

збагачувальний комбінат» істинна густина - 3183 кг/м^3 , масова доля оксиду заліза 25,3 %; ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат» істинна густина - 4421 кг/м^3 , вміст Fe_2O_3 - 63,87 %.

Для подальших досліджень залізородний концентрат ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат» виявився некондиційним через високий вміст пилуватих та глинистих часток та глини у грудках. Тому було обрано матеріал ПрАТ «Полтавський гірничо-збагачувальний комбінат». Однак додавання залізородного матеріалу зменшує міцність бетону, що потрібно враховувати при підборі складу бетону.

У різних поєднаннях ці компоненти покращували одні властивості бетону і бетонної суміші та погіршували інші. Тому важливою задачею було відшукати необхідні пропорції при яких би зростала середня густина, легкоукладальність, зменшувалась розшаровуваність бетонної суміші і не зменшувалась міцність бетону.

В результаті досліджень було підібрано склад бетону який найбільше відповідав вищезазначеним умовам, що наведений в таблиці 2.

Таблиця 2

Запропонований склад спеціального бетону

Склад бетону №	Цемент, кг/м^3	Пісок $M_{кр} 1,33$, кг/м^3	Щебінь, кг/м^3	
			2,5-5 мм	5-20 мм
1	360	575	320	1180

Підібраний склад дозволяє отримати бетон з середньою густиною 2594 кг/м^3 і міцністю на стиск 70,6 МПа. При цьому осадка стандартного конуса бетонної суміші становить 3 см.

Графік розігріву бетону при твердненні, визначеного згідно [19], наведено на рисунку 2.

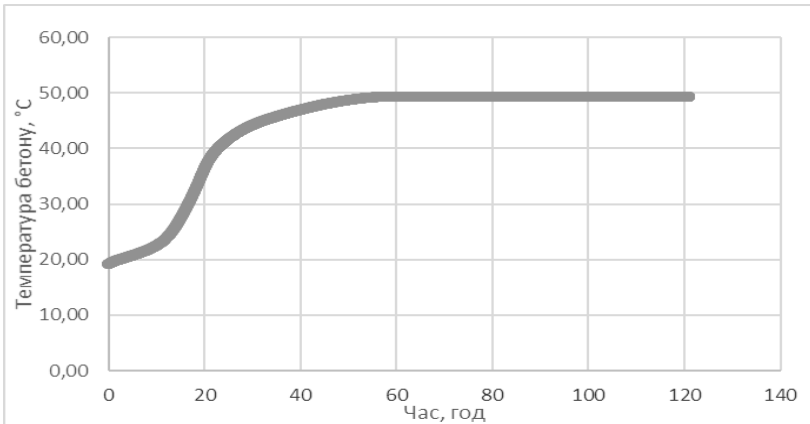


Рис.2. Температура розігріву бетону

Висновки. 1. Проведено аналіз сировинних матеріалів вітчизняного виробництва. Так, портландцемент М500 з низькою екзотерією при твердненні не може бути використаний в складі спеціального бетону для енергетичного будівництва, оскільки сума мінералів аліту і алюмінату кальція (C_3S+C_2A) перевищує 58%. Бездобавочні цементи нижчих марок в Україні не виробляються. Тому, в подальших дослідженнях передбачається використання цементу з додаванням доменного шлаку, що відповідає марці ПЦІІ/А-Ш-400Р-Н (швидкотвердіючий із нормованим мінералогічним складом).

2. Розроблені рецептури спеціального бетону з підвищеною середньою густиною від 2545 до 2655 kg/m^3 і міцністю на стиск від 54,6 МПа.

1. Шейнич Л.А., Анопко Д.В. Радиационнозащитные безусадочные мелкозернистые бетоны на чугунных заполнителях. Киев, 2011. 193 с.
2. Плугин А.Н., Плугин А.А., Калинин О.А. Структура и долговременные свойства бетона.// Строительные материалы и изделия, №4, 2003. с. 17-22.
3. Барсуков О.А., Эльяшевич М.А. Основы атомной физики. – М., 2006. 647 с.
4. Бродер Д.Л., Зайцев Л.Н., Комочков М.М. Бетон в защите ядерных установок. – М., 1966. 214 с.
5. Дубровский В.Б. Радиационная стойкость строительных материалов. – М., 1977. 278 с.
6. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. Санкт-Петербург, 2006. 691 с.
7. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013 Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ, 2013.
8. ДСТУ Б В.2.7-273:2011 Вода для бетонів і розчинів. Технічні умови (ГОСТ 23732-79, MOD). Київ, 2011.
9. ДСТУ Б В.2.7-43-96 Будівельні матеріали. Бетони важкі. Технічні умови. Київ, 1996.
10. Кривенко П.В., Пушкарьова К.К., Барановський В.Б. та ін. Будівельне матеріалознавство. – К.: Основа, 2007. 697 с.
11. ДСТУ Б В.2.7-32-95 Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ, 1995.
12. ДСТУ 3704:2013 Продукція залізорудна. Загальні технічні умови. Київ, 2014.
13. НИИЖБ Руководство по возведению тепловых агрегатов из жаростойкого бетона. – М., 1983. 65с.
14. ДСТУ Б В.2.7-75-98 Будівельні матеріали. Щебінь та гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Технічні умови. Київ, 1998.
15. ДСТУ Б В.2.7-46:2010 Будівельні матеріали. Цементи загально-будівельного призначення. Технічні умови. Київ, 2011.
16. СЕПРОЦЕМ. Отчет по оценке строительно-технических свойств цементов. Харьков, 2018. 22 с.
17. ДСТУ Б В.2.7-205:2009 Будівельні матеріали. Золи-виносу теплових електростанцій для бетонів. Технічні умови. Київ, 2010.
18. ДСТУ Б В.2.7-96-2000 (ГОСТ 7473-94) Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Технічні умови. Київ, 2000.

19. ДСТУ Б В.2.7-225:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Метод визначення тепловиділення при твердненні. Київ, 2009.

- 1.** Sheinich L.A., Anopko D.V., Radiatsionnozashchitnye bezusadochnye melkozernistye betony na chugunnykh zapolnitelyakh. Kyiv, 2011. 193 s.
- 2.** Plugin A.N., Plugin A.A., Kalinin O.A. Struktura i dolgovremennye svoystva betona. Stroitelnye materialy i izdeliya, №4, 2003. ss. 17-22.
- 3.** Barsukov O.A., Elyashevich M.A., Osnovy atomnoy fiziki. – M., 2006. 647 s.
- 4.** Broder D.L., Zaytsev L.N., Komochkov M.M., Beton v zashchite yadernykh ustanovok. – M., 1966. 214 s.
- 5.** Dubrovskiy V.B., Radiatsionnaya stoykost' stroitelnykh materialov. – M., 1977. 278 s.
- 6.** Dvorkin L.I., Dvorkin O.L., Osnovy betonovedeniya. Sankt-Peterburg, 2006. 691 s.
- 7.** DSTU-N B V.2.7-299:2013 Nastsnova shchodo vyznachennya skladu vazhkogo betonu. Kyiv, 2013
- 8.** DSTU B V.2.7-273:2011 Voda dlya betoniv i rozchyniv. Tekhnichni umovy (GOST 23732-79, MOD). Kyiv, 2011
- 9.** DSTU B V.2.7-43-96 Budivelni materialy. Betony vazhki. Tekhnichni umovy. Kyiv, 1996
- 10.** Krivenko P.V., Pushkar'ova K.K., Baranovskiy V.B., i in. Budivel'ne materialoznavstvo. – K.: Osnova, 2007. 697 s.
- 11.** DSTU B V.2.7-32-95 Budivelni materialy. Pisok shchilnyy pryrodnyy dlya budivelnikh materialiv, vyrobiv, konstruksiy i robit. Tekhnichni umovy. Kyiv, 1995
- 12.** DSTU 3704:2013 Produktsiya zalizorudna. Zagalni tekhnichni umovy. Kyiv, 2014
- 13.** NIIZHB Rukovodstvo po vozvedeniyu teplovykh agregatov iz zharostyogo betona. – M., 1983. 65 s.
- 14.** DSTU B V.2.7-75-98 Budivelni materialy. Shchebin' ta graviy shchil'ni pryrodni dlya budivelnikh materialiv, vyrobiv, konstruksiy i robit. Tekhnichni umovy. Kyiv, 1998
- 15.** DSTU B V.2.7-46:2010 Budivelni materialy. Tsementy zagal'no-budivelnogo pryznachennya. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2011
- 16.** SEPROTSEM. Otch'ot po otsenke stroitelno-tekhnicheskikh svoystv cementov. Khar'kov, 2018. 22 s.
- 17.** DSTU B V.2.7-205:2009 Budivelni materialy. Zoly-vynosu teplovykh elektrostanciy dlya betoniv. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2010
- 18.** DSTU B V.2.7-96-2000 (GOST 7473-94) Budivelni materialy. Sumishi betonni. Tekhnichni umovy. Kyiv, 2000
- 19.** DSTU B V.2.7-225:2009 Budivelni materialy. Betony. Metod vyznachennya teplovydilennya pry tverdnenni. Kyiv, 2009

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТОНКОМЕЛЕННОГО ДОЛОМІТУ НА ГРАНУЛОМЕТРИЧНИЙ СКЛАД ЦЕМЕНТІВ ТА ЇХ МІЦНОСТІ.

ШПІРЬКО М. В., д.т.н., **ТРОФИМОВА І. А.,** асп. Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»

SHPIRKO N. V., Dr. Sc. **TROFIMOVA I. A.,** postgraduate student, (Tech.), PHEI «Pridneprovska State Academy of Civil Engineering and Architecture»

У статті наведені результати досліджень змін гранулометричного складу цементів різних марок при частковій заміні цементу та його змішуванням з тонкомеленим доломитом, та впливу на міцність цементного каменю.

Reducing the cost of cements and decline CO₂ emissions from their production is the most relevant. The main directions for solving this problem is the addition and partial replacement of Portland cement clinker with active or inactive mineral additives. The introduction of mineral additives occurs at the stage of co-grinding with cement. At the same time. Approximately the same particle size distribution of both cement and mineral additive is achieved. The second problem, which is the use mineral additives in concrete, is the compaction of cement matrix in concrete in combination with plasticizing additives, resulting in improved physical-mechanical properties of concrete – reduced water absorption, porosity, increased compressive strength, etc. But the little attention is paid to the issues of how the particle size distribution and specific surface area of cement with finey ground mineral additives changes. In this study, a partial replacement of cement with thin-milled dolomite is carried out, the specific surface of which is significantly higher than that of the used cements.

Ключові слова: мінеральні домішки, гранулометричний склад, питома поверхня, розмір часток, міцність при стиску, міцність на згин
Mineral additives, particle size distribution, granulometric composition, specific surface area, particle size, compressive strength, flexural strength

Постановка проблеми. В 2012 році світове виробництво цементу склало приблизно 3,8 Гт, що еквівалентно 3,2Гт викидів CO₂ це орієнтовно 8% антропогенних викидів CO₂. За три роки світове виробництво цементу зросло до 4,5 Гт, отже збільшились і викиди CO₂. [1,2]. Тому модифікація виробництва цементу разом із частковою заміною цементу тонкомеленими мінеральними домішками, які мають гідравлічну або пуцоланову активність набуло широкого

використання у виробництві цементів та бетонів. ДСТУ 2.7-128:2006 класифікує мінеральні домішки на активні та наповнювачі. Добавки-наповнювачі до цементу - це мінеральні добавки, які не впливають суттєво на процеси гідратації цементу, однак поліпшують його гранулометричний склад та структуру цементного каменю. Вони можуть бути інертними або мати слабкі гідравлічні чи пуцоланічні властивості.

Добавки-наповнювачі залежно від їх хімічного складу поділяють на кремнеземні, карбонатні та інші, що не відносяться до кремнеземних або карбонатних добавок-наповнювачів, а також ті, що за фізико-механічними характеристиками та хімічним складом не відповідають окремим вимогам активних мінеральних добавок.[3] І якщо використання активних мінеральних домішок природного або промислового походження досліджено достатньо добре і знайшло широке використання в цементній промисловості та виробництві бетонів, то питання активної участі карбонатних домішок в хімічних процесах, що протікають при гідратації композиційних цементів залишається спірним питанням. А тим більше проблема використання доломітів та вапняків, їх питомої поверхні, яка дозволить ефективно заміщувати цементний клінкер залишається недостатньо дослідженою для промислового використання.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Використання тонкомеленого доломіту як неактивної мінеральної домішки для виробництва бетонів в Білорусі обумовлено національним стандартом СТБ2060-2010[3], де нормується два види тонкомеленого доломіту з питомою поверхнею (275 ± 75) і (500 ± 100) $\text{м}^2/\text{кг}$. В роботі [4] відзначається, що введення карбонатних порід доцільно в цементі з підвищеним вмістом C_3A . В той же час є думка, що якість цементів з тонкомеленими домішками карбонатних порід в основному залежить від кількісного співвідношення клінкеру та домішок, тонкості помелу компонентів, співвідношення дисперсності часток та їх рівномірного розподілу в порошок. Домішка повинна бути представлена великими частками, а клінкер – дрібними й дрібнішими.[5] В наукових працях [6,7] для досліджень використано мінеральні домішки з питомою поверхнею, яку можливо отримати в промислових умовах - $5500 \text{ см}^2/\text{г}$ і $7523 \text{ см}^2/\text{г}$. Заміщення цементу доломітом досягало 20%, але немає інформації, яким був гранулометричний склад цементу і як змінювалася питома поверхня суміші цементу з доломітом, щоб обґрунтувати фізико-механічні властивості цементного каменю. В роботі [7] для заміщення частини цементу використовувалась суміш вапняку, доломіту та кремнезему, який як відомо, має пуцоланову активність, тому визначити вплив тонкомеленого доломіту та вапняку на отримані результати дослідження неможливо. В роботі [8] використано тонкомелений доломіт для часткової заміни цементу, але не вказаний гранулометричний склад використаних для досліджень матеріалів.

Для мінеральних домішок - наповнювачів значний вплив на утворення та кристалізацію новоутворень має наявність на їх поверхні активних центрів. За даними роботи [9], активні центри в зоні контакту цементу з наповнювачем

сприяють прискоренню зародження кристалів новоутворень, збільшення їх кількості, деякою орієнтованістю нової фази щодо частинок наповнювача, що є причиною підвищення адгезії наповнювача до в'язучого, а це і визначає ефективність введення домішок наповнювачів. Тому в даному дослідженні приділено увагу змінам гранулометричного складу середньоалюмінатних цементів при частковій заміні тонкомеленим доломітом з високою питомою поверхнею та вплив такої заміни на характеристики міцності.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дослідження проводилися на цементах ПЦІ-А/Ш-400 Здолбунівського цементного заводу та ПЦІ-500Н Івано-Франківського цементного комбінату. В якості сировини для виготовлення тонкомеленого доломіту використовувались відходи продуктів дроблення Докучаївського доломітового кар'єру.

Для марки цементу ПЦІ-А/Ш-400, в складі якого вже міститься близько 20% меленого гранульованого шлаку, заміна частини цементу доломітом склала 5,10,15%; для ПЦІ-500Н - 10,15,20%.

1. Отримання тонкомеленого доломіту.

Відходи продуктів дроблення доломіту були висушені в сушильній шафі, подрібнені в лабораторних щоківній та валковій дробарках. Утворений пісок з доломіту був помелений в лабораторному вібротоліні. Після валкової дробарки гранулометричний склад доломіту був визначений розсівом скрізь сита наступних розмірів: №5,0 – 0,91%; №2,0 – 3,61%; №1,6 – 5,93%; №1,0 – 17,95%; №0,5 – 18,88%; №0,16 – 20,85%; Дно – 31,85%

Розмір часток та питому поверхню тонкомеленого доломіту після помелу у вібротоліні визначали за допомогою лазерного аналізатора Mastersizer 2000E.

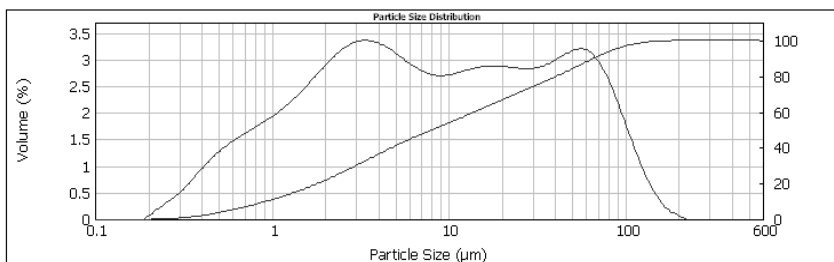
Пісок з доломіту піддавався помелу впродовж трьох годин з визначенням гранулометричного складу після кожної години помелу.

Гранулометричний склад меленого доломіту залежно від тривалості помелу представлений у табл. 1 та на рис. 1.

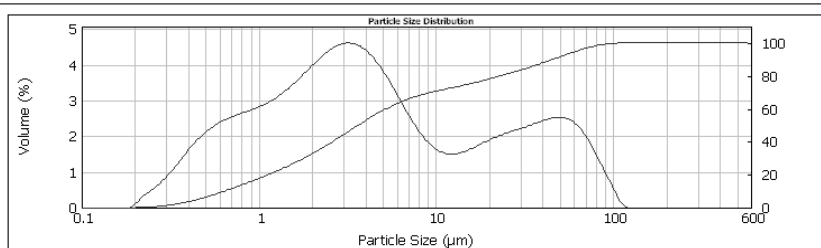
Таблиця 1

Гранулометричний склад тонкомеленого доломіту залежно від тривалості помелу.

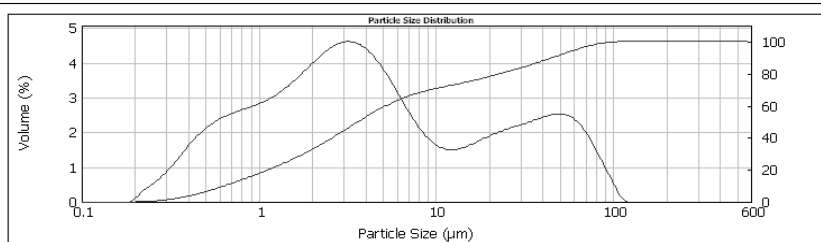
Час помелу, годин	Збільшення вмісту тонких фракцій, %	Зміст фракцій зерен відходів доломіту, %						
		<0,5	0,5-1	1-5	5-10	10-20	20-40	40-80
1		3,32	7,06	28,69	14,83	12,74	12,93	13,87
2		5,24	10,22	40,81	13,63	7,61	8,95	10,84
	Відносно часу помелу 1 год.	57,83	44,75	42,24				
3		5,68	11,14	42,06	11,83	7,31	9,78	10,32
	Відносно часу помелу 2 год.	8,39	9,0	2,81				



а)



б)



в)

Рис.1 Гранулометричний склад доломіту: а) після 1 години помелу; б) після 2 годин помелу; в) після 3 годин помелу

В результаті помелу було отримано: максимальний розмір часток доломіту – 111,71µм, кількість часток менш 2 µм склала 32,67%, 50% склали частки з розміром 3,641µм. Питома поверхня часток доломіту 12674 см²/г, насипна щільність 1018г/см³, щільність часток доломіту 2700г/см³. Результати розмелювання зерен доломіту, приведені в табл.1 свідчать про те, що в основному розмелювання здійснювалося за рахунок фракцій 10-20µм, 20-40µм, 40-80µм та більше 80µм. Це призвело до збільшення у гранулометричному складі тонкомеленого доломіту вмісту зерен з розмірами менше 0,5µм, 1-5µм, 5-10µм. Порівняння результатів помелу, які приведені в табл. 1 доводить, що найбільш інтенсивний помел відбувається в перші дві години, а потім інтенсивність помелу значно

знижується. В результаті вміст зерен фракцій менше 0,5мкм,0,5-1 мкм,1-5мкм в загальній масі підвищується не суттєво і помел відходів доломіту більше 2 годин стає економічно не ефективний.

2.Заміна частини цементу тонкомеленими відходами доломіту та дослідження зміни гранулометричного складу суміші.

Щоб визначити, як частина тонкомеленого доломіту вплине на гранулометричний склад цементу, попередньо був визначений гранулометричний склад досліджуваних цементів та виготовлені зразки сухої суміші цементу з різним відсотковим вмістом доломіту й також був визначений гранулометричний склад отриманих сумішей. Щоб отримати більш-менш оптимальну структуру цементного каменю за рахунок заповнення дрібними частками доломіту порот між більшими за розміром частками, на Рис.2,3 та табл.2,3 приведені результати заміни 15% цементу ПЦІ-А/Ш-400 і 20% ПЦІ-500Н тонкомеленими відходами доломіту.

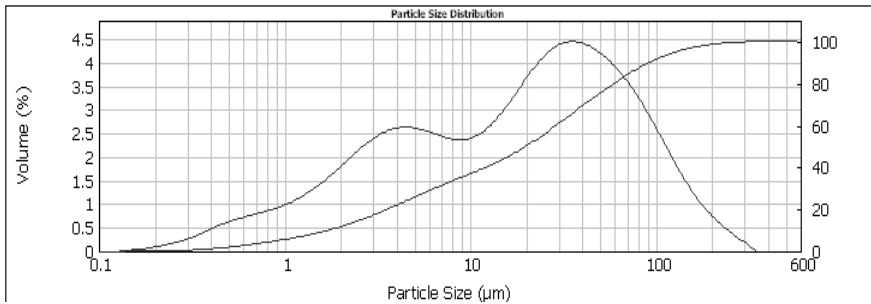
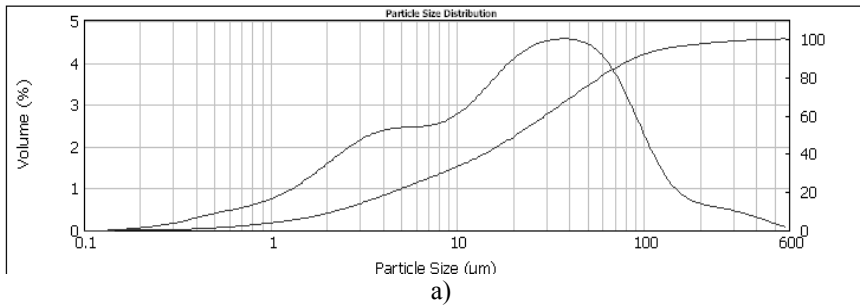


Рис.2 Диференціальний та інтегральний гранулометричний склад в'язучого: а) цементу ПЦІ-А/Ш-400, б) цементу ПЦІ-А/Ш-400 з 15% заміною тонкомеленим доломітом.

Таблиця 2

Гранулометричний склад в'яжучих ПЦІ-А/Ш-400 та ПЦІ-А/Ш-400 з 15% тонкомеленим доломітом

№	Найменування в'яжучого	Зміст фракцій зерен в'яжучих, %						
		<0,5	0,5-1	1-5	5-10	10-20	20-40	40-80
1	ПЦІ-А/Ш-400	1,16	2,11	17,14	11,44	15,36	20,96	17,68
2	ПЦІ-А/Ш-400 з 15% доломіту	2,04	3,5	20,52	11,09	13,14	19,04	17,94
3	Збільшення вмісту тонких фракцій, %	75,86	65,87	17,86				

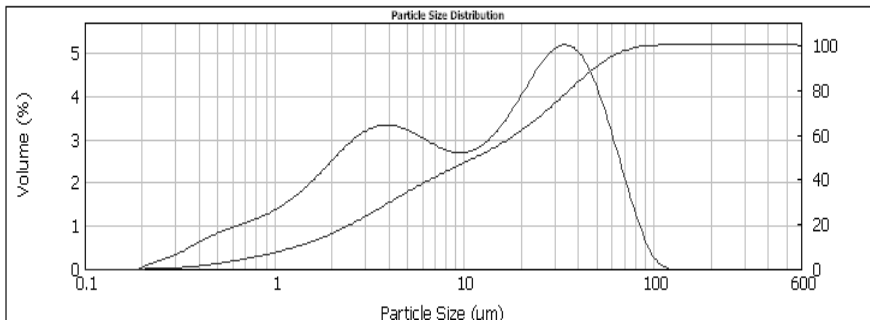
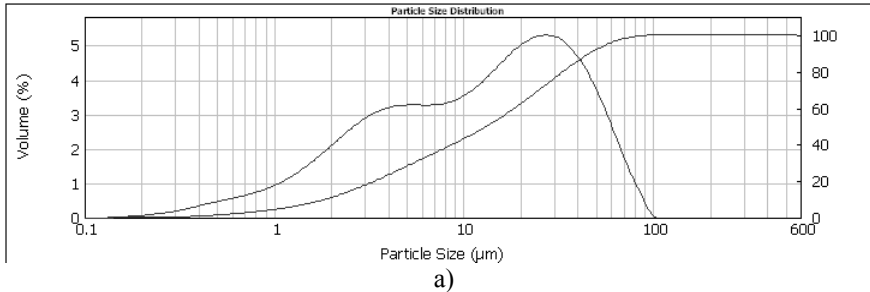


Рис.3 Диференціальний та інтегральний гранулометричний склад в'яжучого: а) цементу ПЦІ-500Н, б) цементу ПЦІ-500Н з 20% заміною тонкомеленим доломітом

Таблиця 3

Гранулометричний склад в'язучих ПЦІ-500Н та ПЦІ-500Н з 20%
заміною тонкомеленим доломітом

№	Найменування в'язучого	Зміст фракцій зерен в'язучих, %						
		<0,5	0,5-1	1-5	5-10	10-20	20-40	40-80
1	ПЦІ-500Н	1,77	2,44	23,89	13,17	18,92	23,07	15,89
2	ПЦІ-500Н з 20% доломіту	2,92	3,92	27,28	13,01	14,21	21,27	15,54
3	Збільшення вмісту тонких фракцій, %	64,97	56,55	14,19				

Аналіз таблиць 2,3 свідчить про те, що заміна 15% цементу ПЦІ-А/Ш-400 тонкомеленим доломітом та 20% цементу ПЦІ-500Н призводить до збільшення вмісту зерен фракції відповідно: менше 0,5мкм на 75,86% та 64,97%; 0,5-1мкм на 65,87% та 56,55%; 1-5мкм на 17,86% та 14,19%. Отже, заміна цементу ПЦІ-А/Ш-400 15% тонкомеленого доломіту сприяє збільшенню вмісту тонких часток краще, ніж заміна 20% цементу ПЦІ-500Н.

3. Дослідження зміни міцності цементного каменю на згин та стиск при частковій заміні в'язучого тонкомеленим доломітом проводили на балочках розміром 4x4x16см, виготовлених з розчину 1:3. В якості заповнювача використали пісок річковий з Мк =1,1. Так як доломіт характеризується низькою водопо потребою в порівнянні з цементом, він сприяє покращенню легкоукладальності суміші, тому водо - тверде відношення залишалось незмінним для цементних зразків та з доломітом.

Результати досліджень представлені в таблиці 4.

Таблиця 4

Дослідження зміни міцності цементного каменю на згин та стиск при частковій заміні в'язучого тонкомеленим доломітом

Найменування в'язучого	Міцність при стиску, МПа	Міцність на згин, МПа	Зниження міцності при заміні доломітом, %	
			При стиску	На згин
ПЦ І-А/Ш-400	21,42	7,03		
ПЦ І -А/Ш-400 +5% доломіту	21,065	6,86	1,66	0,03
ПЦ І -А/Ш-400+10%доломіту	19,749	6,11	7,8	13,03
ПЦ І -А/Ш-400+15%доломіту	19,11	5,91	10,78	15,88
ПЦ І-500Н	29,629	7,53		
ПЦ І-500Н + 10% доломіту	26,467	7,2	10,67	4,3
ПЦ І-500Н + 15% доломіту	24,86	6,86	15,96	11,23

Аналізуючи результати, приведені в таблиці 4, виходить, що при зростанні відсотка часткової заміни тонкомеленим доломітом цементу ПЦІ-А/Ш-400 міцність на стиск знижується менш інтенсивно в зрівнянні зі зразками на цементі ПЦІ-500Н. Таким чином, міцність зразків ПЦІ-А/Ш-400 з 15% доломіту знизилася на 10,78%, в той же час ПЦІ-500Н з 15% доломіту знизився на 15,96% в зрівнянні з контрольними зразками цементу без домішок відповідно. Зворотня залежність спостерігається в дослідженні міцності на згин. В зразках ПЦІ-А/Ш-400 з 15% доломіту міцність на згин знижується на 15,88%, а ПЦІ-500Н з 15% доломіту на 11,23% в зрівнянні з відповідними контрольними зразками.

Зниження міцності на стиск зразків з частковою заміною тонкомеленим доломітом має наступне пояснення.

Як відомо, міцність цементного каменю в основному залежить від кількісного вмісту в ньому $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , гідросилікатів кальцію. При частковій заміні цементу тонкомеленим доломітом відбувається деяке збільшення площі контактів в одиниці об'єму цементного каменю за рахунок збільшення кількості тонких зерен та утворення зв'язків між зернами доломіту та гідросилікатами кальцію. Згідно наукових робіт [4], формування міцності цементного каменю з карбонатвмісними наповнювачами, пояснюються утворенням гідрокарбоалюмінатів кальцію $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot 11\text{H}_2\text{O}$, основних карбонатів кальцію $\text{CaCO}_3 \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, $\text{Mg}(\text{OH})_2 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ та томазіту $\{\text{Ca}_2[\text{Si}(\text{OH})_6] \cdot 12\text{H}_2\text{O}\}(\text{SO}_4)(\text{CO}_3)$. Зіставлення складних структур приведених сполук з набагато більш простими $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , С-S-H, дозволяє зробити висновки, що міцність новоутворень з урахуванням деякого збільшення площі контактів при частковій заміні цементу доломітом не компенсує спад міцності за рахунок зниження вмісту $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , С-S-H.

Висновки. Проведені дослідження свідчать про те, що при заміні 20% цементу ПЦІ-500Н меленим доломітом вміст у в'язучому тонких фракцій збільшується на 56,55-64,97%, а при заміні 15% цементу ПЦІ-А/Ш-400 на 65,87-75,86%. Разом з цим, зниження міцності цементного каменю з тонкомеленим доломітовим наповнювачем відбувається тому, що міцність новоутворень та збільшення площі їх контактів з частками цементу не компенсує зниження міцності цементного каменю з первинним вмістом $\text{Ca}(\text{OH})_2$, CaCO_3 , С-S-H контрольних зразків цементного каменю.

Менш інтенсивне зниження міцності зразків з доломітом на цементі ПЦІ-А/Ш-400 порівняно з ПЦІ-500Н зв'язано з додатковими Вандерваальсовими зв'язками між окремими ділянками часток меленого гранульованого шлаку та доломіту.

Зниження інтенсивності спаду міцності на згин зразків цементного каменю з частковою заміною цементу ПЦІ-500Н порівняно з ПЦІ-А/Ш-400 зв'язано з більшою кількістю слабких контактів в ПЦІ-500Н.

1. Sabbie A. Miller Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050/ Sabbie A. Millera, Vanderley M. Johnb, Sergio A. Pacca, Arpad Horvath //Cement and Concrete Research – Vol. 114. – 2018. – Pp. 115–124.
2. S.A. Miller, A. Horvath, P.J.M. Monteiro, Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20/ S.A. Miller, A. Horvath, P.J.M. Monteiro – Environ. Res. Lett. 11 (2016)
3. СТБ2060-2010 Долomit тонкодисперсный для бетонов и строительных растворов. Технические условия – Госстандарт, Минск – С.1–6
4. Колбасов В.М., Тимашев В.В. Свойства цементов с карбонатными добавками./Цемент №10 – 1981- С.10-12
5. Свойства цементов с карбонатными добавками// Режим доступа <http://cement.ucoz.ru/publ/21-1-0-105>
6. L. Ranjith Kumar Properties of concrete incorporating dolomite powder / L. Ranjith Kumar, J. Kiran, P. Rangarajan // Journal of Mechanical and Civil Engineering – Vol. 14, Issue2 – 2017. – Pp. 78–80.
7. O. Mikhailova Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete / O. Mikhailova, G. Yakovlev, I. Maeva, S. Senkov// Procedia Engineering – Vol. 57. – 2013. – Pp. 775–780.
8. G. Preethi Effect of replacement of cement with Dolomite Powder on the mechanical properties of concrete / G. Preethi, G.Prince Arulraj // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology– Vol.2, Issue 4 – 2015. – Pp. 1083–1088.
9. W. Hansen Drying shrinkage mechanisms in Portland cement paste // Journal of the American Ceramic Society– Vol. 5. – 1987. – Pp. 323–328.

1. Sabbie A. Miller Carbon dioxide reduction potential in the global cement industry by 2050/ Sabbie A. Millera, Vanderley M. Johnb, Sergio A. Pacca, Arpad Horvath //Cement and Concrete Research – Vol. 114. – 2018. – Pp. 115–124.
2. S.A. Miller, A. Horvath, P.J.M. Monteiro, Readily implementable techniques can cut annual CO2 emissions from the production of concrete by over 20/ S.A. Miller, A. Horvath, P.J.M. Monteiro – Environ. Res. Lett. 11 (2016)
3. СТБ2060-2010Долomit тонкодисперсный для бетонов I stroite`nykh rastvorov. Tekhnicheskieskie usloviya – Gosstandart, Minsk – P.1-6
4. Kolbasov V.M., Timashev V.V. Svoystva tsementov s karbonatnymi dobavkami./Tsement №10 – 1981 – P.10-12
5. Svoystva cementov s karbonatnymi dobavkami// Rezhim dostupu <http://cement.ucoz.ru/publ/21-1-0-105>
6. L. Ranjith Kumar Properties of concrete incorporating dolomite powder / L. Ranjith Kumar, J. Kiran, P. Rangarajan // Journal of Mechanical and Civil Engineering – Vol. 14, Issue2 – 2017. – Pp. 78–80.
7. O. Mikhailova Effect of dolomite limestone powder on the compressive strength of concrete /O. Mikhailova, G. Yakovlev, I. Maeva, S. Senkov// Procedia Engineering – Vol. 57. – 2013. – Pp. 775–780
8. G. Preethi Effect of replacement of cement with Dolomite Powder on the mechanical properties of concrete / G. Preethi, G.Prince Arulraj // International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology– Vol.2, Issue 4 – 2015. – Pp. 1083–1088.
9. W. Hansen Drying shrinkage mechanisms in Portland cement paste // Journal of the American Ceramic Society– Vol. 5. – 1987. – Pp. 323–328

INNOVATIVE PROCESS FOR THE RECYCLING OF PRIMARY Li-BATTERIES: LIFE LIBAT PROJECT

ІННОВАЦІЙНИЙ ПРОЦЕС УТИЛІЗАЦІЇ ПЕРВИННИХ Li-БАТАРЕЙ: ПРОЕКТ LIFE LIBAT

L. Baldassari, E. Moscardini, L. Toro (Eco Recycling srl, Via di Vannina 88/94, Rome, IT), **PG. Schiavi, P. Altimari, F. Pagnanelli** (Department of Chemistry, Sapienza University of Rome, P.le A. Moro 5, Rome, IT), **F. Cornaggia** (SEVal srl, Via La Croce 14, Colico, IT)

The treatment process of primary lithium batteries is proposed, which combines mechanical pre-treatment with a hydrometallurgical method for the recovery of ferrous metals, lithium and salts of manganese and graphite. The obtained substances can be used as modifying additives in the production of mineral binders and concrete.

Процедура очищення первинних літєвих батарей, що зараз дотримуються в більшості країн-членів ЄС, передбачає окремий збір та подальше транспортування до очисних споруд. Однак небезпечні характеристики цих відходів також ускладнюють транспортування, тим самим значно збільшуючи витрати на кінцеву обробку. Заводи з переробки в основному базуються на пірометалургійних процесах, які не дозволяють відновити неметали (такі, як графіт) та легкі метали (такі як, літій) та мають негативний вплив на навколишнє середовище через велике споживання енергії та виділення забруднюючих газів.

Запропонований процес очищення первинних літєвих батарей поєднує механічну попередню обробку із гідрометалургійним способом для відновлення чорних металів, літію та солей марганцю та графіту. Отримані речовини можуть бути використані в якості модифікуючих добавок при виробництві мінеральних в'язучих речовин та бетонів.

Key words: recycling, lithium batteries, mechanical pre-treatment, fraction, leachate.

Утилізація, літєві батареї, механічна обробка, фракція, вилуговування.

Introduction. The extensive application of portable energy storage units fostered by technological innovation has determined a rapid increase in the volume of batteries annually placed on the market. Around 211,000 tons of portable batteries were placed on the market in the EEA area, plus Switzerland, in 2013.

This trend and the short lifetime of batteries have imposed the disposal of a progressively increasing flux of end-of-life batteries. In this framework, central issue is represented by the development of processes allowing for the recovery of material from end-of-life batteries. This strategy can reduce the environmental impact of the battery production cycle by preventing the dispersion of the battery hazardous elements (heavy metals) into the environment and, at the same time, providing an alternative material source to the battery manufacture chain.

The collection and recovery of batteries in Europe are regulated by the Directive 2006/66/EC, which prohibits the disposal in landfills or incineration of spent batteries and accumulators. The legislation sets the collection rate at 45% and the recycle rate at 65%, 75% and 50% (by weight) respectively for the lead-, nickel/cadmium- and other (included the lithium primary) batteries.

Around 70% of portable batteries placed on the EU market are non-rechargeable (primary). In this market segment, primary lithium batteries characteristics produce significant recycling difficulties. These are mainly linked to their highly reactivity, determined by the metallic lithium (non-oxidized form) and solvents content, which can generate a risk associated with the formation of flames and explosions.

The treatment procedure of primary lithium batteries currently followed in most EU member states foresees a separate collection and subsequent transport towards the treatment facilities. The hazardous characteristics of these wastes, however, also make complex the transport thus significantly increasing the cost of final treatment. Recycling plants are mainly based on pyrometallurgical processes which do not allow for the recovery of non-metals (such as graphite) and light metals (such as Li) and present negative environmental impacts due to the high energy consumption and pollutant gases release. In general, those types of plants involve substantial investment cost and only big scale plants, whose size is allowed by the treatment of different type of batteries, are economically feasible. The simultaneous processing of different types of batteries characterized by different chemical composition (lithium batteries, manganese based alkaline batteries) greatly increases the difficulties and costs of separation.

Innovative recycling process – LIFE LIBAT project. Within the framework of this internationally critical issue, Eco Recycling (an Italian R&D company), the researchers of the Department of Chemistry of Sapienza University of Rome, and SEVal (the biggest Italian company involved in the collection and treatment of WEEE and batteries) are developing a project aimed at the demonstration of an innovative process for the recycling of primary Li batteries (Li(O)/MnO₂ batteries). The project LIFE LiBat (LIFE16 ENV/IT/000389) has been co-funded by EU LIFE programme.

The proposed process integrates mechanical pre-treatment with a hydrometallurgical treatment route to recover ferrous metals, lithium and

manganese salts, and graphite. Complying with the EU legislation, the project aims to reach a recycling rate greater than 50%.

The process consists of the following steps:

- Mechanical pre-treatment
- Ferrous metal recovery
- Lithium extraction and recovery
- Manganese extraction recovery
- Graphite recovery

The following figure (Figure 1) shows a preliminary material balance of the process related to 100 kg of batteries fed to the treatment:

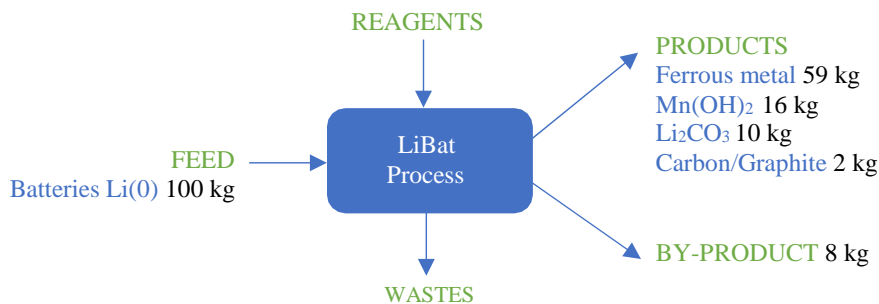


Figure 1. LIFE LiBat process material balance

The process is based on hydrometallurgical approach. Main advantages of this process over pyrometallurgical ones are reduced capital investment, energy savings, reduced environmental impacts and possibility of recovery all cell components.

Pilot Plant – LIFE LiBat project. In the frame of the LIFE LiBat project, a pilot plant with processing capacity of 50 kg of batteries per day have been designed and constructed.

The following figure (Figure 2) shows a block diagram with the main sections of the pilot plant:

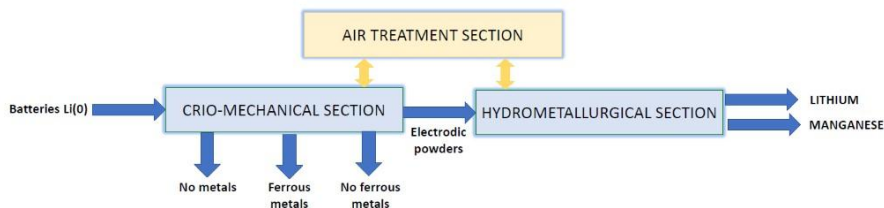


Figure 2. Sections of the LIFE LiBat pilot plant

Three different plant sections have been designed and built:

- **mechanical pre-treatment section.** In order to prevent the explosions and/or flames risk mainly due to the presence of flammable solvents and metallic lithium contained in the batteries, a cryogenic pre-treatment operation is performed before the batteries grinding and separation.

In this section a Li-bearing solution is produced: this leachate is fed to the hydrometallurgical section to recover lithium. The fine solid fraction (electrode powders) is fed to the leaching step. The other product obtained in this phase is ferrous metals (steel of the external case of batteries).

- **hydrometallurgical section.** The leachate which contains lithium is fed to a precipitation reactor, where the deposition of the target compound is obtained. After the filtration of the suspension the lithium is recovered. The electrode powder was fed to a leaching reactor.

There acidic leaching is performed: the leach liquor was first purified, through a controlled precipitation and filtration steps, and then sent to the precipitation reactor. In this unit, through the addition the precipitating agent, the manganese is recovered.

- **air treatment section.** The plant is also controlled by a vapour abatement system to reduce emissions such as powders, organic vapours and acid vapours.

The prototype construction phase has been completed at the SEVal industrial site (Colico, Italy).

In Figure 3 an overview of the plant is reported.



Figure 3. LIFE LiBat pilot plant overview

Preliminary lab tests using crushed materials in pilot plant. Laboratory tests for preliminary characterization of mechanically treated materials were carried out at Sapienza University.

Experiments have been performed using 2.3 kg of ground Li/MnO₂ coin cells, which had been collected, pre-treated and grinded at SEVal industrial site. The samples were sieved obtaining two fractions (Figure 4):

- Fraction A: 20% fine fraction (≤ 1 mm). The characterization of this fraction showed a Li and Mn content respectively 38.5 ± 0.7 and 420 ± 10 mg/g;
- Fraction B: 80% coarse fraction (> 1 mm) which consist of steel case and plastic and it contains 1 ± 1 and 7 ± 2 mg/g of Li and Mn, respectively.

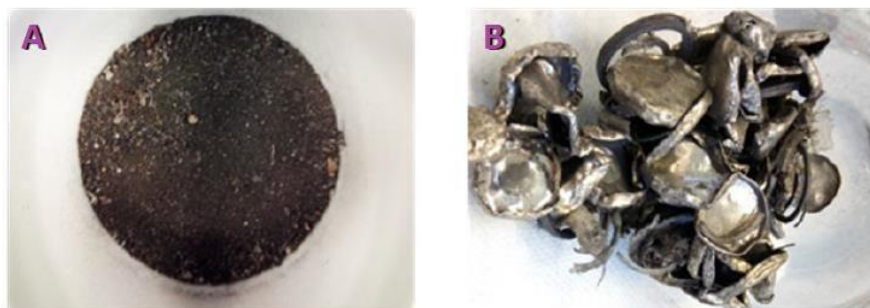


Figure 4. Fine fraction (A) and coarse fraction (B)

Samples were leached with water at room temperature in order to wash the ferrous fraction and extract lithium from the sample. Washed coarse fraction formed by steel is about 75% by mass of the total sample and could be directly recovered after this procedure.

The liquid solution after each batch was reused to treat new samples in order to obtain a solution more progressively concentrated in lithium (maximum concentration was obtained after five washings of the sample, reaching about 4 g/L of Li).

The leachate was filtered to separate a solid powder rich in manganese and a liquid phase containing lithium:

The liquid was treated with sodium carbonate at 95°C for 2 hours under stirring to precipitate Li₂CO₃. The solid (lithium carbonate) was characterized and it resulted composed by 188.4 ± 0.5 mg/g of Li (18.8% w/w) and 0.5% w/w of Zn (impurity probably from the grinding process). Mn and Fe concentrations were not detected. Based on these data, the estimated purity of the product is higher than 99%. Microscopy and elementary analysis found no elements other than carbon and oxygen.

Solids obtained in each washing were collected and treated with sulfuric acid 1.2 M and hydrogen peroxide 20% (v/v) at 85 °C for 3 hours under stirring. The maximum achieved yield of manganese extraction was about 90%. The manganese precipitation was obtained by adding sodium hydroxide until pH 10 to the leachate for 2 hours. The solid was analysed and resulted composed by 500 ± 9 mg/g of Mn, 12% and 0.2% w/w of Li. Based on these data, the estimated purity of the product is about 80%.

Conclusions and perspectives. The demonstration activity will be carried out during next year (2020) in order to validate the energy and material balances and to assess the technical/economic feasibility of the process in a relevant scale size.

The analysis will be performed for the constructed prototype plant and will be successively extended to explore larger scales, the possible applications of the recovered products and the relative incomes derived from their selling. Attention will be devoted to analysing the re-use of the products recovered from electrodic powder ($\text{Mn}(\text{OH})_2$ and Li_2CO_3) in the manufacture of new batteries. The economic feasibility analysis will entail quantifying the costs associated to plant construction, reactant and energy consumption, and waste disposal. The analysis will be assessed by comparing computed costs with the incomes resulting from the sale of recovered fractions and the fee due for the treatment of batteries. Process simulation will be implemented to obtain the economic figures of the different process options and evaluate profitability as process scale varies.

THE INFLUENCE OF ADDITIVES CONTAINING FREE CAO ON THE PROPERTIES OF THE CEMENT PASTE

ВПЛИВ ДОБАВОК, ЩО МІСТЯТЬ ВІЛЬНИЙ CaO, НА ВЛАСТИВОСТІ ЦЕМЕНТНОЇ ПАСТИ

Stanislaw Fic, Head of the Civil Engineering and Architecture Faculty, Andrzej Szewczak, Assistant in Civil Engineering and Architecture Faculty (Lublin University of Technology, Lublin)

Станіслав Фіц, декан факультету цивільного будівництва і архітектури, Анджей Шевчак, асистент факультету цивільного будівництва і архітектури. (Люблінський технологічний університет, Люблін)

Additives and admixtures for concrete and mortar are compounds that added to concrete affect its unique, special features, such as mechanical strength, water resistance, frost resistance, porosity, setting time, segregation capacity during concreting, maturation period, reduction of the required amount mixing water, reducing shrinkage and creep, improving workability during concreting, reactivity. Among the wide range of this compounds, the plasticizers, superplasticizers and pozzolans (fly ash and Microsilica), are most often used. Pozzolans are characterized by hidden binding properties that affect the hydration of cement in reaction with the components and form a secondary C-S-H phase due to the content of SiO₂ and other oxides contained in this phase. An additional task of pozzolan is filling the empty spaces between cement grains and aggregate due to their small particle size (within 1 μm). The large specific surface area of pozzolanic additive grains - about 500 m²/kg for fly ash and 20,000 m²/kg for microsilica facilitates the reaction of oxide components with cement and the process of sealing concrete. In the presented studies, the effect of the NCT additive containing high content of free CaO (about 70%), SiO₂ (about 15%) on the strength properties of cement paste was determined. The chemical composition of the additive, the diffractometric composition, the specific surface and the effect of NCT on the flexural tensile strength and compression of the 4x4x16 cm samples after 28 days were determined. It has been shown that an additive containing free CaO effectively improves the strength properties of samples made of ash cement, with a reduced content of CaO compared to other oxides - Al₂O₃ and SiO₂. The positive effect of the presence of titanium dioxide nanoparticles on the strengthening of the CSH phase by taking SEM images was also noted.

Добавки для бетону і будівельного розчину - це композити, які додаються до бетону і впливають на його властивості, такі як механічна міцність, водостійкість, морозостійкість, пористість, час схоплювання, розшарування, зменшення необхідної кількості води змішування, яка зменшує усадку і повзучість, що поліпшує оброблюваність при бетонуванні. Серед широкого спектру цих добавок найбільш часто використовуються пластифікатори, суперпластифікатори і пуцолани (зола-виносу і мікрокремнезем). Пуцолани характеризуються прихованими в'язучими властивостями, які впливають на гідратацію цементу в реакції з компонентами і утворюють вторинну фазу C-S-H через вміст SiO_2 та інших оксидів, що містяться в цій фазі. Додатковим завданням пуцолани є заповнення порожніх просторів між зернами цементу і заповнювачем через їх малого розміру часток (в межах 1 мкм). Велика питома поверхня зерен пуцоланової добавки - близько $500 \text{ м}^2/\text{кг}$ для золи і $20000 \text{ м}^2/\text{кг}$ для мікрокремнезему полегшує реакцію оксидних компонентів з цементом. У представлених дослідженнях було визначено вплив добавки NCT, що містить високий вміст вільного CaO (близько 70%), SiO_2 (близько 15%), на властивості міцності цементного тесту. Було визначено хімічний склад добавки, дифрактометричний склад, питому поверхню і вплив NCT на міцність на згин і стиску зразків $4 \times 4 \times 16 \text{ см}$ через 28 днів. Було показано, що добавка, яка містить вільний CaO , ефективно покращує міцнісні властивості зразків з зольного цементу з пониженим вмістом CaO в порівнянні з іншими оксидами - Al_2O_3 і SiO_2 . Також було відзначено позитивний вплив присутності наночастинок діоксиду титану на посилення фази CSH шляхом отримання зображень SEM.

Keywords: Cement additives, microsilica, calcium oxide, compression strength
Цементні добавки, мікрокремнезем, оксид кальцію, міцність на стиск

Introduction. Cement-based composites - concrete, mortar and pastes - are the most widely used building materials, mainly in concrete and reinforced concrete constructions [1, 2]. The internal structure of the composite depends on the type of aggregate, cement and the presence of additives and admixtures [1, 3]. Despite the fact that the external macrostructure of concrete and mortar seems to be compact and durable, the internal structure is characterized by elements weakening the composite: pores, technological cracks, shrinkage cracks [4, 5]. The contact layer between cement paste and aggregate is the weakest internal microstructure, the so-called ITZ (Interfacial Transition Zone) (Fig. 1) [6, 7]. Its strengthening significantly affects the physical and mechanical properties of the cement composite.

Among the numerous groups of concrete parameters that can be modified by means of admixtures, a large group are powder substances that affect the setting time and concrete strength [1, 2]. The most commonly used additives are fly ashes

and microsilica. This additives content the SiO_2 and during the reaction with cement components (alite, belite, tricalcium aluminate, brownmillerite) they form the secondary phase C-S-H (calcium - silica - hydrates) [8]. The sealed concrete structure obtained in this way becomes less porous, thereby increasing its strength and durability, and reducing water absorption.

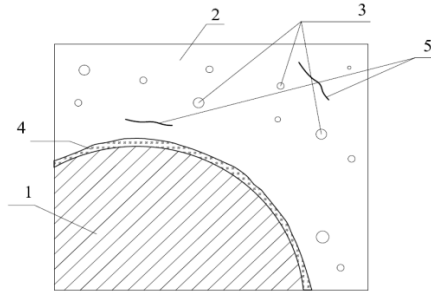


Fig. 1. Interior structure of the concrete

1 – aggregate, 2 – cement paste, 3 – pores and capillars, 4 – ITZ, 5 – cracks

Fly ash and microsilica are not the only powder additives that can be used to modify concrete and increase its durability [1, 2, 3]. The development of nanotechnology allows the selection of additive of components on the scale of nanoparticles that react faster and more effectively with cement components [9, 10]. Thanks to this, it is also possible to increase the early strength of cement composites. This is important e.g. from the point of view of reinforced concrete constructions in variable weather conditions. Determining the optimal amount of additive is most often based on its percentage of dosing in relation to the weight of cement. In case of using new admixtures, it is also important to carry out tests to determine the effect of the additive on mortar / concrete properties with using different types of cements.

The study contains the results of research on the effectiveness of the use of an additive for concrete and mortar called NCT. NCT is an abbreviation of the term "nano - cement technology" - this is an innovative addition to concrete in the form of nanocement, which is added as a substitute for traditional cement. In contrast of fly ashes and microsilica, the main component of NCT, determining its suitability for use in concrete, is a free CaO, which reacts with the components of the cement.

The described preliminary stage of research included examining the effect of the NCT addition on the physical and mechanical properties of cement slurries made of slag cement with lower CaO content. Microsilica was also used in one of the research series. In addition, chemical and granulometric composition, specific surface, specific density and compressive strength of samples made only with NCT were determined. In the final phase of the study, SEM analysis of samples made of pure NCT was performed.

Materials, devices and methods used in research . Samples from cement pastes were made of ash cement with the following parameters:

- CEM II/B-V 32,5 R :
- bulk density – 3,1 g/ cm³,
- specific surface area – 4650 cm²/g,
- early compressive strength (after 2 days) - ≥ 10 MPa
- compressive strength (after 28 days) – $\geq 32,5 \leq 52,5$ MPa

The choice of cement was caused by the reduced CaO content compared to traditional portland cement.

Strength tests were performed on the CONTROLS strength press with a load range of 0 - 3000kN.

As an additive, a product called NCT was used, for which chemical analysis was performed. The chemical composition of NCT was determined by using XRF method. The granulometric analysis was performed using a diffractometer. SEM photos were made by using Scanning electron microscope QUANTA 250 FEG (Fig. 2). The specific surface of the additive in the Blaine apparatus and the specific density were also determined.

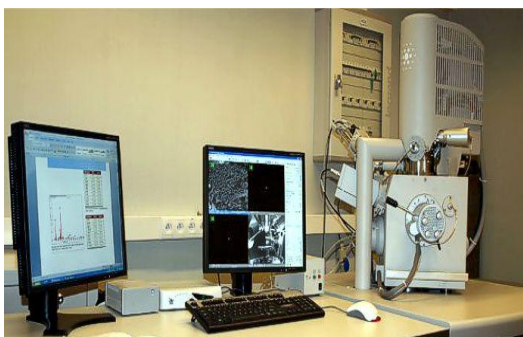


Fig. 2. SEM analysis stand

Series of samples made for testing, with constant factor w/s = 0.4:

Series 1 – samples of cement without addition of NCT

Series 2 – specimens with addition of 5% NCT instead of cement mass

Series 3 – specimens with addition of 10% NCT instead of cement mass

Series 4 – specimens with addition of 5% NCT and 5% microsilica instead of cement mass.

All of the samples was tested on samples with dimensions of 4 x 4 x 16cm. They were stored in laboratory conditions at 20 – 22 °C and relative humidity 85 – 90 %. After 7 days, a part of samples (made of NCT) were tested in compression strength test. The rest of samples, also made from cement, were tested after 28 days.

Results of tests. The results of the chemical analysis of the NCT additive are presented in Table 1.

Table 1

Results of chemical composition of NCT

Element		Content [%]	Oxide	Content [%]
Na	sodium	1.92	Na ₂ O	2.1
Mg	magnesium	0.65	MgO	0.86
Al	aluminium	1.89	Al ₂ O ₃	2.81
Si	silicone	10.83	SiO ₂	17.91
P	phosphorus	0.19	P ₂ O ₅	0.32
S	sulfur	2.09	SO ₃	3.82
Cl	chlorine	0.03	Cl ₂ O ₇	0.02
K	potassium	1.15	K ₂ O	0.96
Ca	calcium	76.51	CaO	67.43
Ti	titanium	0.29	TiO ₂	0.27
V	vanadium	0.02	V ₂ O ₅	0.02
Mn	manganium	0.08	MnO	0.06
Fe	iron	4.15	Fe ₂ O ₃	3.31
Sr	strontium	0.19	SrO	0.12
Hg	mercury	0.002	HgO	0.001
Pb	lead	0.01	PbO	0.01

Table 2 presents the results of the compressive strength tests of samples made of pure NCT.

Table 2

Compression strength tests results of NCT

Compression strength after 7 days			Compression strength after 28 days		
Sample	Force:[kN]	Strength[MPa]	Sample	Force:[kN]	Strength[MPa]
1	67,03	41,89	1	89,53	55,96
2	69,07	43,17	2	83,90	52,44
3	67,19	41,99	3	83,90	52,44
4	64,14	40,09	4	88,80	55,50
5	65,47	40,92	5	83,97	52,48
6	64,89	40,56	6	85,42	53,39
average	66,30	41,44	average	85,92	53,95

Table 3 presents comparative results of the compressive strength tests of samples after 28 days for series 1 - 4.

Table 3

Compression strength tests results of the tested series

Series	Average force [kN]	Average strength [MPa]
1	62.91	39.18
2	89.13	55.43
3	91.50	57.49
4	87.33	54.37

The specific surface area of the NCT additive tested was $3840 \text{ cm}^2 / \text{g}$, the specific density was 3.04 g/cm^3 . SEM analysis and photos taken with it showed the internal structure of hardened NCT (Fig. 3).

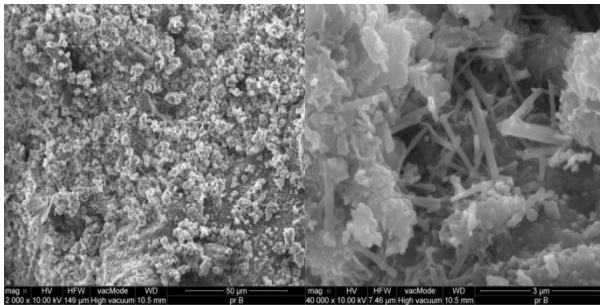


Fig. 3. SEM images of the internal structure of NCT

Analysis of obtained test results and discussion. Based on the conducted research, the following conclusions were drawn:

- addition of the NCT increases the strength of the cement paste samples made from CEM 32.5R, which is caused by a large quantity of CaO, SiO₂ and TiO₂ in the form of nanoparticles, which react with the cement components and give rise to secondary CSH phase and strengthen the structure of the paste,
- even a relatively small addition of NCT (10%) instead of cement will increase the compressive strength by 32%,
- NCT should be treated as an addition to concrete and not as a separate type of cement. It is characterized by relatively high early strength - for samples made for the adopted w/b = 0.4 factor, the average early compressive strength was 41.44 MPa, while the strength after 28 days was 53.95MPa. Comparing these results (indicative) with the requirements for cements, NCT would fulfill the requirements for cement 42.5R,
- in chemical terms, NCT is an innovative addition, in contrast to the most popular concrete additives, which can significantly reduce porosity and water absorption, and increase the compression strength; it does not contain a large amount of reactive silica - approximately 11% of the silicon content, but it contains a large amount of limestone - over 75% and free CaO, which reacts with cement components during hydration, mainly with silica dioxide from cement; as a proof of this fact can be the results of the compressive strength of samples made from cement CEM / II - B - V, where V is the silica fly ash content; there is a clear relationship between amount of the NCT content and the strength of the samples after 28 days; it increases in strength may not be significant - it is about 7% for recipe 2 - addition of 5% NCT and 10% for recipe R3 addition of 10% NCT,

- the chemical nature of NCT is reflected in the results of SEM analysis - in the case of the CaO content, which is the basic constituent of clinker, has the most content within 65-75%, the innovation here lies in the presence of active lime in NCT as a decisive ingredient in the behavior of NCT in the paste; it is interesting that NCT probably also reacts with non-cement microsilica - in the case of the R4 recipe, where 5% microsilica was added to 5% NCT, this combination increased the initial strength by approx. 39% the products of this reaction may be seen in fig. 3;
- NCT mechanism of reaction - chemical reactions which occur after the addition of NCT to cement lead to the formation of the secondary phase of C-S-H - similar to the addition of microsilica, but the course of the reaction is different - after the addition of microsilica, which is a reactive additive form of SiO₂, there is a reaction with CaO from cement, which causes the strengthen of the concrete by sealing the leaven - aggregate contact zone; addition of NCT leads also to the opposite situation: CaO from NCT reacts with the SiO₂ contained in cement, the presence of Si in NCT is also significant - probably also reacts with CaO from cement, but due to the some amount of Si in NCT, the reaction causes a smaller amount of CSH phase than when pure microsilica or silica ashes are added
- NCT also contains a relatively large amount of aluminum and iron, which under the conditions of cement paste are included, as oxides of these metals, in the hydration products - tricalcium aluminate (C₃A) and brownmillerite (C₄AF); it is clear from this that NCT is a multi-component additive for pastes, mortars and concretes.

1. A. M. Neville, Concrete and its properties, Polish Cement, vol. 4, Krakow, Poland, 2010
2. Z. Jamroży, Concrete and its technologies, PWN, vol. 15, Warsaw, Poland, 2015
3. W. Kurdowski, Cement and concrete chemistry, PWN, Warsaw, Poland, 2010
4. S.Fic, M. Szeląg, Analysis of the development of cluster cracks caused by elevated temperatures in cement paste, Construction and Building Materials., vol. 83, s. 223-229, 2015, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.044
5. Vyrovoy V. N., Dorofeew V.S., Technologiczeskaja mechanika kompozycjonnych materialo, Kiev, 1991
6. Karen L. Scrivener, Alison K. Crumbie, Peter Laugesen, The Interfacial Transition Zone (ITZ) Between Cement Paste and Aggregate in Concrete, Interface Science, vol.12, issue 4, pp 411-421, 2004, <https://doi.org/10.1023/B:INTS.0000042339.92990.4c>
7. Sidney Diamond, J. Ingdong Huang, The ITZ in concrete – a different view based on image analysis and SEM observations, Cement and Concrete Composites, vol. 23, issues 2-3, , Pages 179-188, 2001, [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(00\)00065-2](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(00)00065-2)
8. W. Kurdowski, Phase C-S-H - status quo. Part 1, Cement, Lime and Concrete, vol. 13/75, pp. 216 – 222, 2001
9. Jing Xu, Binbin Wang, Junqin Zuo, Modification effects of nanosilica on the interfacial transition zone in concrete: A multiscale approach, Cement and Concrete Composites, vol. 81, Pages 1-10, 2017, doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.04.003
10. Mohamed Amin, Khaled Abu el – Hassan, Effect of using different types of nano materials on mechanical properties of high strength concrete, Construction and Building Materials, vol. 80, 2015, DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.075

STUDY OF THE INFLUENCE OF WASTE PLASTIC STRAW FIBERS ON CONCRETE PROPERTIES

ВИВЧЕННЯ ВПЛИВУ ДОБАВКИ ФІБРИ З ПЛАСТИКОВИХ ВІДХОДІВ НА ВЛАСТИВОСТІ БЕТОНУ

Khatib J.M., Professor of Civil Engineering (Faculty of Engineering, Beirut Arab University, Beirut, Lebanon Faculty of Science and Engineering, University of Wolverhampton, UK)

Jahami A.H., Bakri A., Alaina R. (Faculty of Engineering, Beirut Arab University, Beirut, Lebanon)

Lushnikova N.V. PhD (Eng.), Assoc. Prof. (Department of Architecture and Environmental Design, National University of Water and Environmental Engineering, Rivne, Ukraine)

The paper gives coverage of the perspectives of plastic straw wastes in the form of fine fiber as addition to ordinary concrete. There had been determined the properties of concrete: compressive and splitting tensile strength on the strength properties of ordinary concrete and its density.

Останнім часом перспективи застосування волокон розширюються і включають різні типи таких матеріалів в будівництві. Однією з актуальних проблем будівельної галузі є зменшення забруднення навколишнього середовища. У цьому дослідженні автори застосовують концепцію екологічної стійкості шляхом використання розрізаних на дрібні волокна пластикових соломинок та додавання їх до звичайного бетону для підвищення його міцності на розтяг при розколюванні. З цією метою було проведено експериментальне дослідження, для вивчення впливу пластикових волокон, виготовлених на основі соломинок, на властивості бетону. Частка використаної фібри складала 0%, 0,5%, 1,5% та 3% (за об'ємом). Проведені випробування включали вивчення середньої густини, міцності на стиск і розтяг при розколюванні. Додавання відпрацьованої пластикової фібри призвело до збільшення міцності на розтяг при розколюванні, тоді як спостерігалось зниження міцності на стиск. Результати випробування швидкості проходження ультразвукових хвиль та середньої густини показують незначне зниження значень порівняно із контрольною сумішшю.

Key words: plastic straw fiber, concrete, compressive strength, splitting tensile strength, density, sustainability

пластиковіа фібра з соломинок, бетон, міцність на стиск, міцність на розтяг при розколюванні, густина, екологічна стійкість

Introduction. The rapid urbanization has resulted in large deposition of waste polymer materials. The world's annual consumption of plastic materials has increased from around 5 million tons in the 1950s to nearly 200 million tons in 2017. Polymer wastes are almost non-degradable in the natural environment, but plastic is normally stable and safe for usage. Jahami et al. [6] carried out an experimental investigation on the use of plastic waste in concrete and found that concrete with adequate performance can be achieved. The properties of used fibers enhance the weaknesses of the normal concrete such as the tensile strength.

Kandasamy and Murugesan [9] used plastic cups as a fiber with mean aspect ratio 158.75 and 26.49 (the amount of added fibers of the total volume of the mix). They conducted the experimental studies on a M20 (concrete mix with 28days compressive strength of 20 MPa) mix with addition of polythene fibers (domestic waste plastics) at a dosage of 0.5%. The compressive strength and split tensile strength increase to a maximum when 0.9% of plastic fiber is added to conventional concrete.

Batayneh et al. [4] evaluated the possibility of using full water bottle and granulated plastic waste materials. The mix per fiber plain concrete was designed for compressive strength of 26 MPa at 28 days curing time with a water-cement ratio of 0.45. Cylindrical and beam specimens with 0.5%, 1%, 1.5%, and 2% fibers volume were casted. The test results show a decrease in the slump and compaction factor with increase of fiber addition. It was observed that the concrete was workable up to 1.5 to 2.0 % addition of fibers. Also, with the increase in fiber content bond strength increases. As we introduce PET (polyethylene terephthalate) bottle fibers in concrete, concrete ingredients remained more united.

Belarbi and Acun [5] studied the effect of adding fibers in concrete on static and dynamic properties. Readings were noted at the times of first crack and at of failure. It was found that the compressive strength increased when placing the fiber only. The split tensile strength increased when using plastic fiber sheets at the outer side of the specimen.

Therefore, the main purpose is to discover and track any change in the mechanical properties of the concrete as we add waste plastic fibers (plastic straws). For this reason, 4 different percentages 0%, 0.5%, 1.5%, 3% of plastic fibers were introduced to the concrete mix. Future investigations will examine the effect of this type of fibers on the performance of reinforced concrete slabs under different types of loading. There are studies on mechanical properties of concrete [7, 8, 12-15].

Materials and methods. Mix design. Four trial mixes were prepared in this experiment as an attempt to get on the perfect mixture with good workability and compressive strength equal to (25) MPa at 28 days. The mix proportions of the chosen mixture are (1:1:2) by weight, where the water-cement ratio (W/C) is 0.4. The specific gravity of coarse and fine aggregate were 2550 kg/m³ and 2650 kg/m³ respectively.

Plastic straws with density of 500 kg/m³ were used. They were 2mm shredded and cut to a size of 3cm as shown in Fig. 1. The admixture used is a superplasticizer (Viscocrete) as shown in Fig. 2, added in different percentages of the volume of the cement to the four samples.



Fig. 1. Shredded plastic straws



Fig. 2. Viscocrete admixture

So, using three different percentages and along with the comparison of each percentage with the control mix that does not contain any fibers will allow us to know the influence in a very detailed way. All the data are listed in Tab. 1.

Table 1

Mixing quantities of the four samples, kg/m³

Samples	Cement	Sand	Water	Gravel (kg)	Straws	Admixture
PS-0	670.4	670.4	268.19	1340.95	0	0
PS-0.5	670.4	670.4	268.19	1340.95	2.5	0.6704
PS-1.5	670.4	670.4	268.19	1340.95	7.5	1.0056
mPS-3	670.4	670.4	268.19	1340.95	15	1.3408

Mixing procedures. After preparing all the quantities needed, mix concrete in a suitable mixer as shown in Fig. 3, or by hand in batches of such size as to leave about 10 % excess after molding the test specimens. The mixing procedure will be as required by ASTM Standards 31/C 31M [3].



Fig.3. Concrete mixer



Fig.4. Compacting using a tamping rod



Fig. 5. Curing the samples

The cylinders (10cm diameter and 20cm length) and the cubes of 10 cm in size were cast in two layers. Each layer was compacted 25 times using a tamping rod. by hand. The slump value of the control mix (i.e. 0% fibers) was 5.3cm. This value started to decrease to 4.7 cm, 1.5 cm and 0.7 cm for mixes with 0.5%, 1.5% and 3% fibers respectively.

3 cylindrical samples were cast and tested under compressive strength, and another three were tested in the split tensile strength. Curing of concrete is the control of moisture content and temperature of concrete. Which is maintained by providing it with water from external sources as shown in Fig. 5.

Testing. Compressive strength of concrete cubes is determined according to the American Standard of Testing Materials by applying a compressive axial load until failure occurs (ASTM C39/C39M – 18) [1]. The test is conducted on a compression-testing machine. The cylinders were used to determine the split tensile strength according to ASTM C496/C496M – 17 [2]. It is an indirect method of testing tensile strength of concrete. Fig. 7 shows the cylinder and the machine for testing. The load was applied at a rate of 0.7 to 1.4 MPa/min until failure. The split tensile strength was calculated as follows:

$$T=2P/ \pi \times L \times D, \tag{1}$$

where T is the splitting tensile strength, MPa; P is the maximum applied load indicated by the testing machine, N; D is the diameter of the specimen in mm; L is the length of the specimen in mm.



Fig. 6. Sample under compressive strength test



Fig. 7. Sample under splitting tensile test

Results and Discussion. *Mass density* was measured for all mixes, and then the average density was presented in Fig. 8. It can obviously be seen that control mix had the highest density (2501 kg/m³), and as the percentage of straws increased, the mass density was decreased. This can be justified by the light mass density of the used straws. Fig. 9 shows that using straws as fibers in concrete mixes may slightly increase its compressive strength, which is clearly shown when adding 0.5% of PS fibers to concrete mix. However, adding more than 0.5% of PS fiber will lead to a reduction in compressive strength that reached around 37% at 28 days when adding 3% fibers compared to the control mix. Fig.10 and 11 shows the cylinders after testing for both PS-3 and PS-0 respectively.

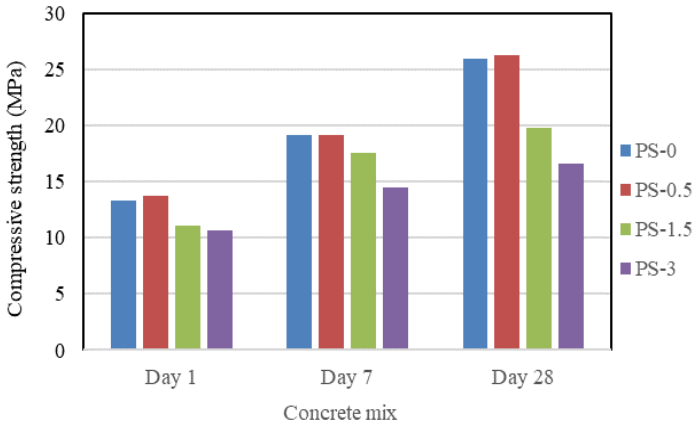


Fig. 9. Compressive strength of concretes containing varying amounts of

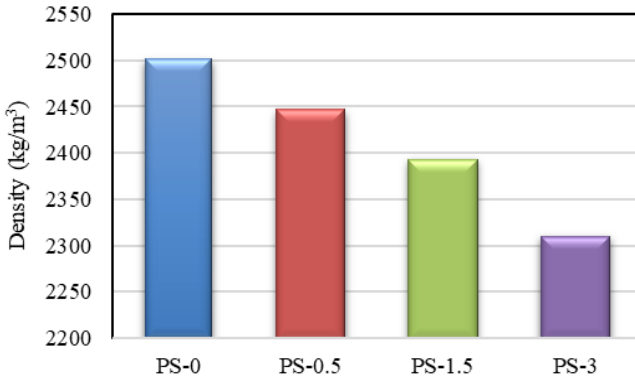


Fig. 8. Density of concretes containing varying amounts of fibers



Fig.10. Damaged cylinder from PS-3 sample



Fig. 11. Damaged cylinder from PS-0 sample

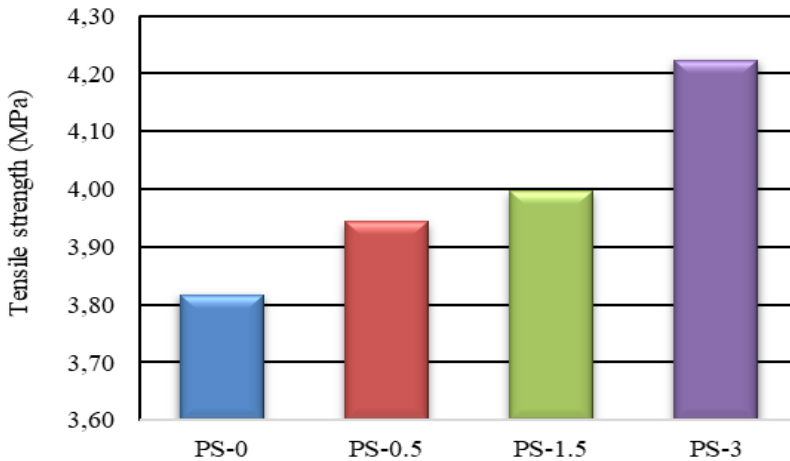


Fig.12. Splitting tensile strength of concretes containing varying amounts of fibers

Fig. 12 shows the splitting tensile values. They indicate that the tensile strength of concrete increases as the content of fibers increases. Fig. 13 shows the good distribution of fibers in concrete samples. Results show that using 3% of PS fibers may increase the tensile strength of concrete by 10% at 28 days. More analysis was performed regarding the ratio between tensile to compressive strength for all samples. Table 2 represents that ratio. We can conclude that the ratio between

tensile to compressive strength increases as the percentage of added PS fibers increases. Sample PS-0 has a percentage ratio of 14.7% whereas for PS-3 it is 25.4% which is clearly higher.



Fig.13. Fiber distribution after testing PS-0.5 sample

Table 2

Ratio between tensile and compressive strength at different ages

Age (days)	PS-0	PS-0.5	PS-1.5	PS-3
1	0.13	0.15	0.20	0.22
7	0.12	0.13	0.15	0.18
28	0.15	0.15	0.20	0.25

Conclusions. The following conclusions can be made. Adding plastic straw fibers to concrete showed a reduction in density from 2500 kg/m³ for PS-0 to 2308kg/m³ for PS-3; due to the light density of the added fibers. Adding PS fibers by a percentage of 0.5% helped increased the compressive strength. All other percentages beyond 0.5% led to a decrease in the compressive strength. Using PS fibers increased the tensile strength of concrete.

1. ASTM C39 / C39M - 18 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
2. ASTM C496 / C496M - 17 Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens.
3. ASTM Standards 31/C 31M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field.
4. Batayneh M., Marie I., Asi I., (2006) Use of selected waste materials in concrete mixes, Waste Management, 27, pp 1870–1876.

5. Belarbi, A., Bora, A., (2013) FRS Systems in Shear Strengthening of Reinforced Concrete Structures. *Procedia Engineering*, 57, pp. 2-8.
6. Jahami, A., Khatib, J., Baalbaki, O. & Sonebi, M. (2019) Prediction of deflection in reinforced concrete beams containing plastic waste. 3rd International Conference on Bio-Based Building Materials Belfast, UK, pp. 551-555.
7. Jahami, A., Temsah, Y., Khatib J., Sonebi M. (2018) Numerical Study for the Effect of Carbon Fiber Reinforced Polymers (CFRP) Sheets on Structural Behavior of Posttensioned Slab Subjected to Impact Loading, *Proceedings of the Symposium on Concrete Modelling – CONMOD 2018, RILEM PRO 127*, Edited by Erik Schlangen et al., pp. 259-267.
8. Jahami, A., Temsah, Y., Khatib, J. (2019) The efficiency of using CFRP as a strengthening technique for reinforced concrete beams subjected to blast loading. *International Journal of Advanced Structural Engineering*. DOI:10.1007/s40091-019-00242-w. URL: <http://link.springer.com/10.1007/s40091-019-00242-w> (date of application: 11.10.2019).
9. Kandasamy R. and Murugesan R. (2011). Fiber reinforced concrete using domestic waste plastics as fibers. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 6, No. 3, March, pp. 75-82.
10. Khatib, J., Jahami, A. & Baalbaki, O. (2019). Flexural characteristics of reinforced concrete beams containing lightweight aggregate in the tensile zone. *Fifth International Conference on Sustainable Construction Materials and Technologies*, Kingston University, London, UK. ISSN 2515-3048 (Print), ISSN 2515-3056 (Online)
11. Nibudey, R & Nagarnaik, P.B. & Parbat, Dhananjay & Pande, A. (2013). Strengths Prediction of Plastic fiber Reinforced concrete (M30). *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)* ISSN: 2248-9622. 3. 2248-9622.
12. Temsah, Y., Jahami, A., Khatib, J. and Sonebi, M. (2018). Numerical Analysis of a Reinforced Concrete Beam under Blast Loading, *MATEC Web of Conferences* 149(3):02063. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902063>.
13. Temsah, Y., Jahami, A., Khatib, J. and Sonebi, M. (2018). Numerical Derivation of Iso-Damaged Curve for a Reinforced Concrete Beam Subjected to Blast Loading, *MATEC Web of Conferences* 149(3):02016. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201814902016>.
14. Temsah, Y., Jahami, A., Khatib, J. and Firat, S. (2017). Numerical study for RC beams subjected to blast waves. In: *1st International Turkish World Engineering and Science Congress in Antalya*. Antalya, Turkey.
15. Temsah, Y., Jahami, A., Khatib, J. and Firat, S. (2017). Single Degree of Freedom Approach of a Reinforced Concrete Beam Subjected to Blast Loading. In: *1st International Turkish World Engineering and Science Congress in Antalya*. Antalya, Turkey.

ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ
РЕСУРСОЕКОНОМНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД

УДК 539.3

ПОБУДОВА ДІЙНИХ ДІАГРАМ МЕХАНІЧНОГО СТАНУ
ДЕРЕВИНИ « σ - u » СУЦІЛЬНОГО ПЕРЕРІЗУ ЯЛИНИ ТА БЕРЕЗИ ЗА
ЖОРСТКОГО РЕЖИМУ ВИПРОБУВАНЬ

REAL DIAGRAM CONSTRUCTION OF MECHANICAL CONDITION OF
TIMBER " σ - u " WITH SOLID SURFACE CUTTING OF SPRUCE UNDER
HARD TEST MODE

Гомон С.С., к.т.н., доц., Гомон П.С., к.т.н., доц. (Національний університет
водного господарства та природокористування, Україна, м.Рівне)

Gomon S.S., Ph.D., associate professor, Gomon P.S., Ph.D., associate professor
(National university of water and environmental engineering, Rivne)

Наведено методику експериментальних досліджень суцільної деревини
за жорсткого режиму випробувань на стиск вздовж волокон. Побудовано
діаграми механічного стану деревини ялини, берези «F- Δ » (переміщення
плити пресу) та « σ - u » (деформування деревини) зі спадною віткою за
поздовжнього стиску при одноразовому короткочасному навантаженні.
Отримано основні параметри діаграми « σ - u »: граничну міцність
деревини, критичні та граничні деформації.

A detailed literature sources review on the construction of diagrams of mechanical
condition of wood under different loading methods was conducted. The technique
of experimental researches of different species of solid wood under rigid mode of
compression test along the fibers was presented. The experimental researches were
carried out on the hydraulic press STM-100 with the relevant software at the
Ternopil Ivan Puluj National Technical University. The samples were tested at a
standard wetness of 12% without damage at different loading speeds within 1.5
mm / min. up to 4.5 mm / min. Diagrams of the mechanical state of spruce, birch
"F- Δ " and " σ - u " with a descending branch were constructed. The basic parameters
of the σ - u diagram for spruce wood were received: the critical compressive
strength is $f_{c,o,d,cr} = 43.6$ MPa, the critical deformation $u_{c,fin,d,u} = 54.5 \cdot 10^{-4}$ mm/mm with the corresponding
residual strength $\sigma_{c,u,d} = 36.2$ MPa; for birch wood: critical strength is $f_{c,o,d,cr} =$
46.1 MPa, critical deformations $u_{c,fin,d,u} = 59.3 \cdot 10^{-4}$ mm/mm with corresponding residual strength $\sigma_{c,u,d} = 39.6$ MPa. It is

pointed out that the loading speed practically does not affect the strength and deformability of different species of wood.

Ключові слова: Деревина, деформації, напруження, діаграми, міцність. Timber, deformation, loadings, diagrams, strength.

Вступ. Одним з найперспективніших матеріалів та конструкцій в різних галузях промисловості, зокрема в промисловому та цивільному будівництві (підлоги, вікна, двері, різні вузли та деталі, перекриття та покриття будинків, споруд та ін.); дорожньому та в будівництві залізниці (мости, настили, палі, шпали, платформи); суднобудуванні; меблевій промисловості, є і буде залишатися ще багато років деревина різних порід. Одні породи деревини, в більшій мірі хвойні (сосна, ялина, модрина, тис, ялиця), використовуються в будівництві в несучих конструкцій будинків і споруд, мостових конструкціях і т.д., а інші – листяні (береза, ясен, вільха, дуб та ін.) використовуються для оздоблювальних робіт, столярних виробів, підлог та в інших галузях для різних цілей.

Деревина є природним анізотропним, пружно-пластичним матеріалом. Внутрішня будова деревини є досить складною, щоб можна було виділити основні закономірності, не вдаючись до припущень різного роду. Міцність та деформативність деревини залежить від багатьох факторів та впливів. До таких факторів належать вологість, вік, вади, пошкодження, робота деревини за різних видів навантаження.

В наш час, прогрес в різних галузях народного господарства дозволяє випробовувати різні матеріали та конструкції з використанням найсучаснішого обладнання. Тому постала необхідність визначати фізико-механічні характеристики матеріалів та конструкцій ще з більшою точністю та достовірністю аж до досягнення матеріалами критичних та граничних деформацій, тобто до повного руйнування. В останні роки були розроблені та виготовлені сервогідравлічні та електромеханічні преси та до них сучасні комп'ютерні програми, які дозволяють випробовувати та визначати більшість основних фізико-механічних властивостей від початку роботи матеріалу (конструкції) і до самого руйнування. А отже, і є можливість побудови дійсних діаграм механічного стану (зі спадною віткою) за експериментальних досліджень. Це є актуальною та перспективною задачею для дослідників з ціллю використання в подальших сучасних розрахунках будівельних конструкцій та різних елементів та деталей, що використовуються в інших галузях господарства. Побудова та опис таких діаграм деформування дасть можливість більш широко і повно розкрити напружено-деформований стан різних порід деревини та їх реальну роботу за різних видів навантаження.

Аналіз останніх досліджень. Експериментальні дослідження деревини на стиск, як і інших матеріалів, можливо проводити двома способами: 1) за

приростом навантажень (м'який режим випробувань); 2) за приростом переміщень (жорсткий режим випробувань). Перший спосіб дозволяє проводити такі дослідження з обмеженими можливостями, тобто будувати діаграму « σ - u » до певної точки висхідної вітки (рис.1). Другий спосіб дозволяє будувати діаграму « σ - u » від початку навантаження зразків і аж до його руйнування. При цьому сучасне випробувальне обладнання та відповідні програмні комплекси дають можливість визначати основні її параметри в будь-який момент завантаження на висхідній та спадній вітках.

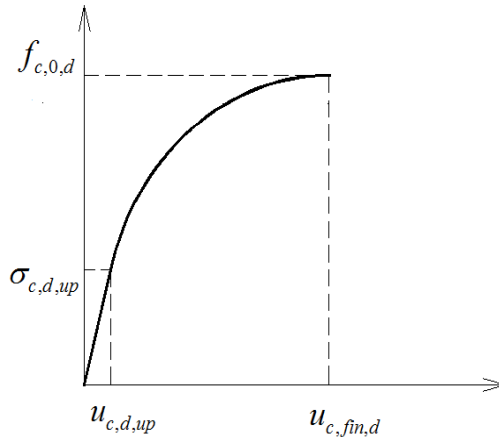


Рис. 1 - Діаграма деформування деревини на стиск вздовж волокон за м'якого режиму випробувань

Експериментальними дослідженнями роботи деревини на стиск вздовж волокон займалися ряд відомих вітчизняних та закордонних вчених: Иванов А.М. [1], Быков В.В. [2], Белянкін Ф.П. [3], Baumann R., LangG [4]. Ці дослідження проводилися за м'якого режиму випробувань (рис. 1).

Дослідження повних діаграм деформування деревини сосни за жорсткого режиму випробувань почалися з початку 21 сторіччя. До таких належать роботи Тутурин С.В. [5], Вареника К.А. [6] та наші дослідження [7,8] виконані саме за такого режиму прикладення навантажень.

В наведених роботах [5,6,7,8] проводились тільки експериментально-теоретичні дослідження деревини сосни на стиск вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань, а інші породи деревини не досліджувалися.

Метою даної роботи є експериментальні дослідження та побудова діаграм механічного стану деревини « σ - u » суцільного перерізу ялини та берези на стиск вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань та визначення основних параметрів напружено-деформованого стану.

Методика експериментальних досліджень. Для вирішення поставленої мети було виготовлено серію зразків суцільного перерізу конструкційних розмірів 1 сорту різних порід деревини перерізом 30х30х120 мм (рис.2). Даний переріз призми дозволяє враховувати мікро- та макроструктуру деревини. Випробуванню піддавались наступні породи деревини: хвойні породи – ялина; листяні – береза. Деревя, з яких були виготовлені зразки деревини, були вирощені, зокрема, ялина - в лісах Рівненської області; береза – в лісах Волинської області.

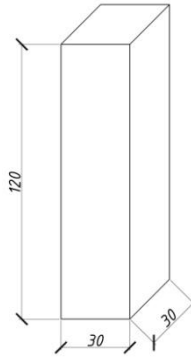


Рис.2 - Геометричні розміри зразків

Висушування заготовок деревини проводили у спеціальних висушувальних камерах до стандартної вологості 12 %. Вологість деревини контролювалась за допомогою вологоміра. Виготовлення зразків різних порід деревини проводили з довгих брусків.

Експериментальні дослідження проводились на сервогідролічному пресі СТМ-100 (рис.3) з відповідним програмним забезпеченням в Тернопільському національному технічному університеті ім. Пулюя. Інтерфейс з програмним забезпеченням показано на рис.4. Максимальне навантаження пресу складає 10 т.

Навантаження зразків проводилося і контролювалося за допомогою комп'ютера та відповідного програмного забезпечення. При випробуванні зразків інтерфейс комп'ютера показує швидкість завантаження, навантаження при відповідному переміщенні преса, час випробування зразка та інші параметри.

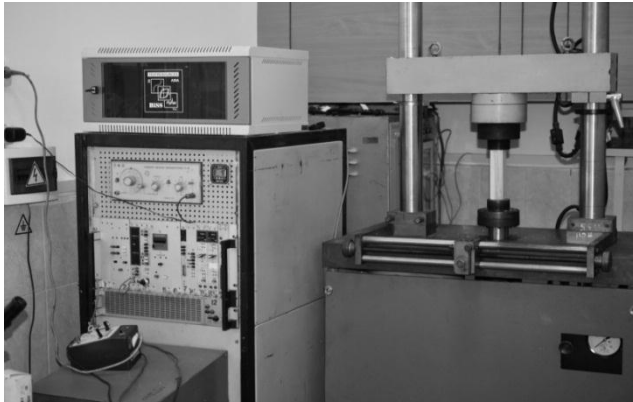


Рис.3 - Сервогідралічний прес STM-100

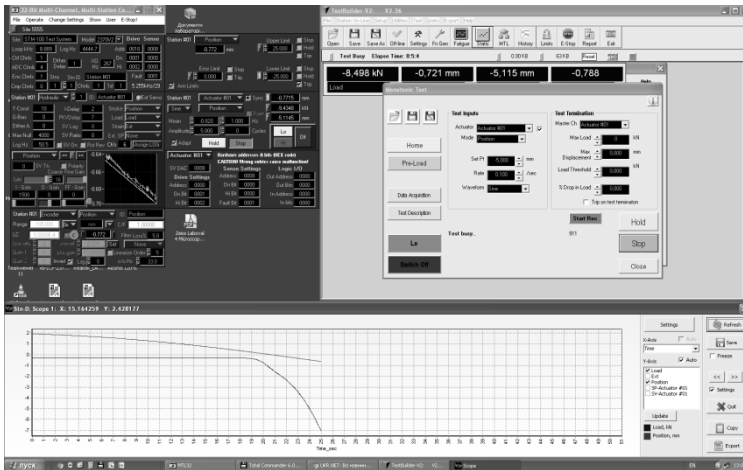


Рис.4 - Інтерфейс з програмним забезпеченням

Результати відбору зразків та випробувань. Зразки випробовувались за стандартної вологості 12% без пошкоджень (1 сорт деревини) за наступних швидкостей навантажень: 0,025 мм/с (1,5 мм/хв.), 0,05 мм/с (3,0 мм/хв.), 0,075 мм/с (4,5 мм/хв.). Перед початком кожного випробування проводилось додаткове вимірювання перерізу зразків та їх вологості. До випробувань допускалися призми з перерізом 30x30x120 мм (± 1 мм) та з вологістю 12% ($\pm 1\%$). Якщо зразки не відповідали даним параметрам, то вони вибраковувались. Кількість призм для досліджень складала не менше 3 шт.

для кожної швидкості навантаження та породи деревини. Зразки центрувалися по фізичним осям.

Після випробування зразків були побудовані діаграми переміщень плит пресу «F-Δ» та діаграми деформування деревини «σ-u» ялини та берези від початку завантаження і аж до його руйнування за жорсткого режиму випробування за середніми значеннями (рис. 5, 6).

Напруження в будь-якій точці діаграми визначалось за формулою

$$\sigma = \frac{F}{A}. \quad (1)$$

Деформації в будь-якій точці діаграми визначались за формулою

$$u = \frac{\Delta}{h}. \quad (2)$$

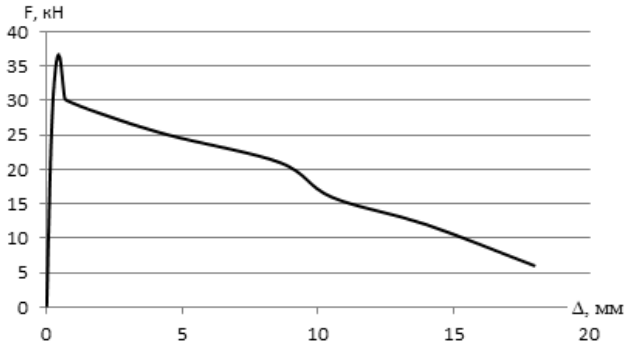


Рис.5–Повна діаграма «навантаження переміщення» «F-Δ» за повздовжнього стиску деревини ялини від початку завантаження і до руйнування

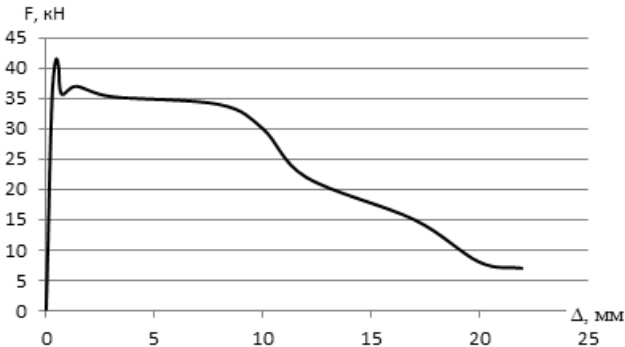


Рис.6 -Повна діаграма «навантаження переміщення» «F-Δ» за повздовжнього стиску деревини берези від початку завантаження і до руйнування

Всі побудовані діаграми механічного стану деревини « σ - u » з обмеженням в точці граничних деформацій показано на рис.7, 8.

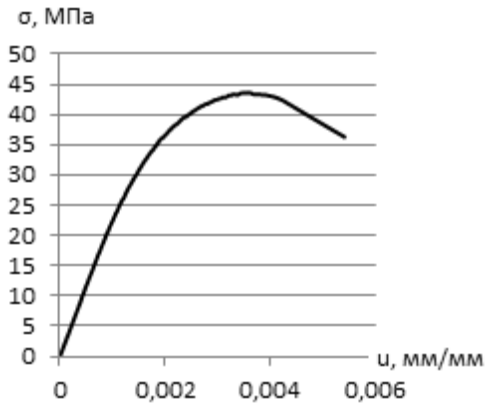


Рис.7 - Діаграма «напруження-деформації» « σ - u » деревини ялини

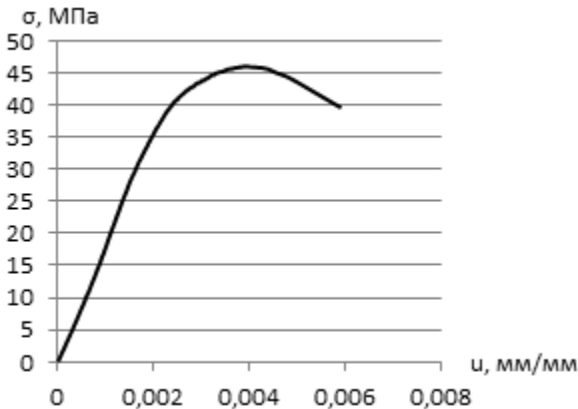


Рис.8 - Діаграма «напруження-деформації» « σ - u » деревини берези

Після побудови дійсних діаграм деформування деревини « σ - u » були отримані наступні параметри:

- для деревини ялини: середня гранична міцність стиску складає $f_{c,o,d,cr} = 43,6$ МПа, середні критичні деформації складають $u_{c,fin,d} = 36,3 \cdot 10^{-4}$ мм/мм, середні граничні деформації складають $u_{c,fin,d,u} = 54,5 \cdot 10^{-4}$ мм/мм з відповідною залишковою міцністю $\sigma_{c,u,d} = 36,2$ МПа;

- для деревини берези: середня гранична міцність стиску складає $f_{c,o,d,cr} = 46,1$ МПа, середні критичні деформації складають $u_{c,fin,d} = 39,5 \cdot 10^{-4}$ мм/мм, середні граничні деформації складають $u_{c,fin,d,u} = 59,3 \cdot 10^{-4}$ мм/мм з відповідною залишковою міцністю $\sigma_{c,u,d} = 39,6$ МПа.

Аналізуючи спадну вітку деформування деревини вздовж волокон, можливо спостерігати явно виділені дві ділянки деформування (рис.5,6). Перша ділянка початку спадної вітки характеризується стрімким зменшенням міцності матеріалу, а друга – збільшенням деформування матеріалу за менш стрімкого зменшення міцності.

Виходячи з невеличкого попереднього аналізу, величину значень граничних відносних деформацій (використання в подальших розрахунках) необхідно встановлювати на першій ділянці спадної вітки з величиною $u_{c,fin,d,u} = 1,5u_{c,fin,d,u}$ (прийняті при аналізі всіх діаграм деформування різних порід деревини).

Руйнування зразків деревини показано на рис. 9.

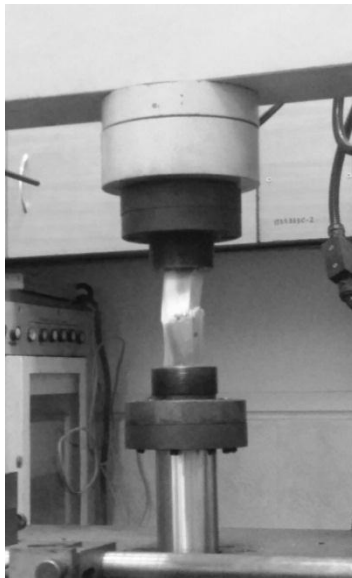


Рис. 9 – Характерне руйнування зразків деревини

Після побудови діаграм було встановлено, що швидкість навантаження в межах 0,025 мм/с (1,5 мм/хв.) - 0,075 мм/с (4,5 мм/хв.) практично не впливає на міцнісні та деформативні властивості різних порід деревини.

- Висновки.** 1. Розроблена методика експериментальних досліджень деревини суцільного перерізу різних порід (хвойних – ялини; листяних – берези) на стиск вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань.
2. Вперше побудовані діаграми механічного стану деревини ялини, берези «F-Δ» (переміщення плити пресу) та «σ-u» (деформування деревини) зі спадною віткою за поздовжнього стиску при одноразовому короткочасному навантаженні від початку навантаження і аж до руйнування зразків, які отримані за експериментальних досліджень на сервогідралічному пресі СТМ-100 з відповідним програмним забезпеченням.
3. Отримані основні параметри таких діаграм, зокрема, для деревини ялини: середня гранична міцність стиску складає $f_{c,o,d,cr} = 43,6$ МПа, середні критичні деформації складають $u_{c,fin,d} = 36,3 \cdot 10^{-4}$ мм/мм, середні граничні деформації складають $u_{c,fin,d,u} = 54,5 \cdot 10^{-4}$ мм/мм з відповідною залишковою міцністю $\sigma_{c,u,d} = 36,2$ МПа; для деревини берези: середня гранична міцність стиску складає $f_{c,o,d,cr} = 46,1$ МПа, середні критичні деформації складають $u_{c,fin,d} = 39,5 \cdot 10^{-4}$ мм/мм, середні граничні деформації складають $u_{c,fin,d,u} = 59,3 \cdot 10^{-4}$ мм/мм з відповідною залишковою міцністю $\sigma_{c,u,d} = 39,6$ МПа.
4. Швидкість навантаження в межах 0,025 мм/с (1,5 мм/хв) - 0,075 мм/с (4,5 мм/хв) практично не впливає на міцнісні та деформативні властивості різних порід деревини.
5. Також в подальшому необхідно провести експериментальні дослідження деревини хвойних та листяних порід суцільного перерізу на стиск вздовж волокон за жорсткого режиму випробувань при одночасній дії трьох різних факторів.

1. Иванов А.М. Исследования диаграммы механических испытаний древесины. Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1959. №4. С. 116 – 122.
Ivanov A.M. Issledovaniya diagrammy mekhanicheskikh ispytaniy drevesiny. Izv. vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura. 1959. №4. S. 116 – 122.
2. Быков В.В. Экспериментальные исследования прочности и деформативности древесины сибирской лиственницы при сжатии и растяжении вдоль волокон с учетом длительного действия нагрузки. Известия вузов. Строительство и архитектура, 1967. №8. С. 3-8.
Bykov V.V. Eksperimental'nyye issledovaniya prochnosti i deformativnosti drevesiny sibirskoy listvennitsy pri szhatii i rastyazhenii vdol' volokon s uchetom dlitel'nogo deystviya nagruzki: Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura, 1967. №8. S.3-8.
3. Белянкин Ф.П. Длительное сопротивление дерева: научное пособие. Москва: Госстройиздат, 1934. 134с.
Belyankin F.P. Dlitel'noye soprotivleniye dereva: nauchnoye posobiye. Moskva: Gosstroyizdat, 1934. 134s.
4. Baumann R., Lang G. Das Holz als Bausstoff. 1927. P. 48-53.

5. Тутурин С.В. Механическая прочность древесины: дис. ... докт. техн. наук: 01.02.04. – Москва, 2005. 318с.
Tuturin S.V. Mekhanicheskaya prochnost' drevesiny: dis. ... dokt. tekhn. nauk: 01.02.04. – Moskva, 2005. 318s.
6. Вареник К. А. Расчет центрально-сжатых деревянных элементов с учетом ползучести: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.01. Новгород Великий: НГУ им. Ярослава Мудрого, 2015. 167 с.
Varenik K. A. Raschet tsentral'no-szhatikh derevyannykh elementov s uchetom polzuchesti: dis. ... kand. tekhn. nauk: 05.23.01. Novgorod Velikiy: NGU im. Yaroslava Mudrogo, 2015. 167 s.
7. Гомон С.С., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за одноразового короткочасного деформування до повної втрати міцності матеріалу. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. Рівне: Вид-во НУВГП, 2012. Вип 23. С. 166-171.
Gomon S.S., Gomon S.S., Sasov's'kiy T.A. Diahrami mekhanichnoho stanu derevyny sosny za odnorazovoho kortkochasnoho deformuvannya do povnoyi Vtrata mitsnosti materialu. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, Budivli ta sporudy. Zb. nauk. prats'. Rivne: Vyd-vo NUVHP, 2012. Vyp 23. S. 166-171.
8. Гомон С.С., Гомон С.С., Сасовський Т.А. Діаграми механічного стану деревини сосни за повторного деформування до повної втрати міцності матеріалу. Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. Зб. наук. праць. Рівне: Вид-во НУВГП, 2012. Вип 24. С. 106-112.
Gomon S.S., Gomon S.S., Sasov's'kyu T.A. Diahramy mekhanichnoho stanu derevyny sosny za povtornoho deformuvannya do povnoyi vtraty mitsnosti materialu. Resursoekonomni materialy, konstruktsiyi, budivli ta sporudy. Zb. nauk. prats'. Rivne: Vyd-vo NUVHP, 2012. Vyp 24. S. 106-112.

**ДОСВІД РОЗРАХУНКОВО-ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОЦІНЮВАННЯ
ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ БУДІВЛІ ШКОЛИ**

**EXPERIENCE OF DESIGN AND EXPERIMENTAL EVALUATION OF
ENERGY INDICATORS OF SCHOOL BUILDING**

**Настоящий В.А., к.т.н., проф., Пашинський В.А., д.т.н., проф.,
Пашинський М.В., к.т.н., Джирма С.О., к.т.н., доц. (Центральноукраїнський
національний технічний університет, м. Кропивницький)**

**Nastoiashchyi V.A., PhD, prof., Pashynskiy V.A., Sc.D., prof.,
Pashynskiy M.V., PhD, Dzhyrma S.O., PhD, associate professor (Central
Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi)**

**Висвітлена методика і результати оцінювання показників енергетичної
ефективності будівлі школи з урахуванням теплових характеристик
огороджувальних конструкцій, отриманих за даними вимірювань у
процесі натурних обстежень. Проаналізовано вплив термомодернізації на
клас енергетичної ефективності будівлі.**

**During the examination, numerous damages of the outer wall cladding,
unfilled seams between the wall blocks and poorly executed junction of
window and door frames to a wall were revealed, where heat transfer is highly
increased due to air leakage from the inside of the building. The actual values
of the heat transfer resistance of walls and translucent structures,
experimentally established using a thermohygrometer, do not meet the
requirements of current standards. Examination of the outer walls and
window blocks using a thermal imager revealed thermal anomalies that
significantly reduce the thermal insulation characteristics of enclosure
structures. It is noted that the use of technical devices makes it easy to detect
thermal anomalies and to estimate the characteristics of enclosure structures.
Based on the research results, an energy passport of the building was
developed. The design value of specific energy consumption is $55.7 \text{ kW}\times\text{h}/\text{m}^3$.
Taking into account the maximum value of $35 \text{ kW}\times\text{h}/\text{m}^3$ for educational
institutions, that are a subject of thermal modernization, the building was
examined and classified as energy efficiency class F. Design proposals have
been developed for thermal modernization of the building by using ventilated
facade systems with rockwool insulation. After thermal modernization, the
specific energy consumption are reduced to $34.7 \text{ kW}\times\text{h}/\text{m}^2$, and the energy
efficiency is improving to class C.**

Ключові слова:

Будівля, огорожувальні конструкції, обстеження, клас енергоефективності.
Building, enclosure structures, expertise, energy efficiency class.

Постановка проблеми. Зменшення витрат енергетичних ресурсів є стратегічним завданням економіки України. Для будівельної галузі це завдання значною мірою зводиться до підвищення енергоефективності житлових і громадських будівель та відповідного зниження витрат тепла на опалення. Основні принципи енергозбереження в будівництві встановлені Законом України "Про енергетичну ефективність будівель" та деталізовані в нормативних документах. Особливе значення має задача підвищення рівня енергетичної ефективності існуючих будівель шляхом проведення термомодернізації. При розв'язанні цього завдання вагому роль відіграють натурні обстеження технічного стану огорожувальних конструкцій будівель, що підлягають термомодернізації, з метою якомога точнішого відображення їх реальних теплових та енергетичних характеристик.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Енергетичний аудит будівель з обстеженням технічного стану, визначенням теплових характеристик огорожувальних конструкцій та оцінюванням показників енергетичної ефективності здійснюється згідно з вимогами нормативних документів України. Загальні вимоги до енергетичної ефективності будівель та теплових характеристик огорожень встановлені Законом України [1] та нормами проектування [2]. Енергетичний аудит будівель проводиться за методикою [3] і завершується визначенням теплових характеристик огорожень за [4, 5] та оцінюванням показників енергетичної ефективності методами [2, 6] з урахуванням температурного режиму експлуатації за [2, 7]. Кінцевим результатом енергетичного аудиту є енергетичний паспорт, складений згідно з вимогами [2, 8].

Термомодернізація існуючих будівель зазвичай здійснюється шляхом додаткового фасадного утеплення згідно з вимогами норм [9, 10] та типовими технічними рішеннями, наприклад [11]. Чинна нормативна база забезпечує можливість підвищення енергетичних показників існуючих будівель шляхом здійснення термомодернізації за результатами енергетичного аудиту.

Мета роботи полягає у викладенні досвіду та практичних результатів виконання комплексу досліджень і заходів з підвищення енергетичної ефективності будівлі навчального закладу.

Архітектурно-конструктивна характеристика об'єкта дослідження. З метою проведення термомодернізації обстежена будівля однієї з шкіл на території Кіровоградської області. Район будівництва відноситься до першої температурної зони за ДБН [1] з розрахунковою зимовою температурою зовнішнього повітря -22°C .

Будівля школи, зведена в 1985 році за типовим проектом, у плані має Т-подібну форму з габаритними розмірами 75×37 м. До триповерхового корпусу висотою 11,2 м, фасад якого зображений на рисунку 1, прибудована двоповерхова частина висотою 6,6 м зі спортзалом, їдальнею та допоміжними приміщеннями. Висота поверху – 3,3 м. Будівля безкаркасна з поздовжніми несучими стінами та монолітними бетонними стрічковими фундаментами.



Рис. 1. Фасад головного корпусу будівлі школи

Зовнішні стіни виконані з легкобетонних блоків товщиною 400 мм та облицьовані керамічною плиткою на цементно-піщаному розчині. Внутрішня поверхня стін опоряджена штукатуркою з вапняно-піщаного розчину. Вікна й зовнішні двері раніше замінені на металопластикові з однокамерними склопакетами. Перекриття виконані із залізобетонних круглопустотних плит, шатрова покрівля основного корпусу покрита хвилястими азбцементними листами. Двоповерхова прибудова спортивного залу та кухні з їдальнею має плоский дах без технічного поверху.

Загальна площа зовнішніх огорожувальних конструкцій складає 4633 м² при коефіцієнті скління фасадів 0,25. Площа опалюваних приміщень становить 3047 м², опалюваний об'єм – 10515 м³, показник компактності будинку дорівнює 0,44.

Методика й результати натурального обстеження. Обстеження будівлі школи виконувалося з метою виявлення реальних теплових характеристик зовнішніх огорожувальних конструкцій, оцінювання класу енергетичної ефективності будівлі та розроблення заходів з термомодернізації. У процесі натурального обстеження зафіксовані дефекти й пошкодження огорожувальних конструкцій, встановлені їх теплові характеристики, виявлені зони підвищеної теплопровідності, підготовлені вихідні дані для оцінювання втрат тепла та визначення класу енергетичної ефективності будівлі. Особливістю проведеного обстеження є експериментальне оцінювання опору теплопередачі стін за допомогою термогігрометра, а також оцінювання температурного режиму зовнішньої поверхні стін і виявлення зон підвищеної теплопровідності за допомогою тепловізора.

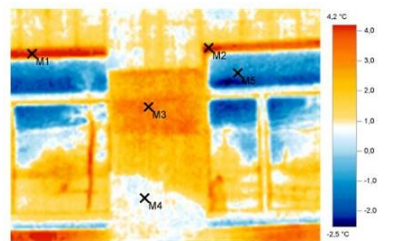
У результаті обстеження виявлена низка системних дефектів та пошкоджень зовнішніх стін, серед яких найчастіше зустрічаються:

- руйнування зовнішнього облицювання, площа якого сягає 20% поверхні зовнішніх стін;
- незаповнені шви між стіновими блоками, крізь які відбувається витік теплого повітря зсередини будівлі;
- неякісно виконані вузли примикання віконних і дверних блоків до стін, у яких спостерігається різко підвищена теплопередача.

Наявність вказаних дефектів підтверджується результатами спостережень за допомогою тепловізора, приклади яких наведені на рисунках 2 і 3. На обох рисунках наведені фотографії поверхні стіни поряд з відповідними результатами сканування тепловізором.

Обстеження зовнішніх стін та віконних блоків за допомогою тепловізора дозволили не лише проаналізувати температурні поля зовнішньої поверхні огорожень, але й оцінити температури в характерних точках зовнішніх стін. При цьому виявлені теплові аномалії, які істотно знижують теплоізоляційні властивості огорожень:

- підвищена теплопередача в зоні віконних відкосів;
- підвищена теплопередача на швах стінових блоків унаслідок незаповнених швів та витoku внутрішнього повітря крізь ці шви;
- в зонах, не захищених зруйнованою облицювальною плиткою, температура зовнішньої поверхні стіни може бути на 4...10°C вищою, ніж на інших ділянках стіни.



Графические данные: Дата: 06.03.2018
 Время: 14:11:40
 Файл: IR_00290.BMT

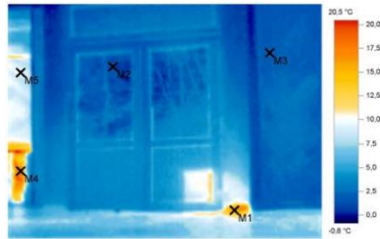
Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.
Точка измерения 1	4,7	0,95
Точка измерения 2	4,5	0,95
Точка измерения 3	3,1	0,95
Точка измерения 4	0,9	0,95

Рис. 2. Результат сканування простінка та віконних відкосів

Рисунок 2 ілюструє підвищену теплопередачу в зоні віконних відкосів, а також нерівномірність розподілу температури по зовнішній поверхні стіни,

особливо в зоні пошкодженого зовнішнього облицювання. На рисунку 3 відображені теплові аномалії у вузлах примикання входних дверей, де обстеженнями виявлені не заповнені монтажною піною ділянки. Через ці ділянки монтажних швів відбувається витік внутрішнього повітря, яке й нагріває зовнішню поверхню стін до температури 15...18°C.



Графические данные: Дата: 06.03.2018
 Время: 14:03:32
 Файл: IR_00283.BMT

Выделение изображений:

Измеряемые объекты	Темп. [°C]	Излуч.
Точка измерения 1	15,8	0,95
Точка измерения 2	1,0	0,95
Точка измерения 3	1,8	0,95
Точка измерения 4	17,9	0,95

Рис. 3. Результат сканування вузлів примикання входних дверей

Досвід сканування поверхні стін тепловізором показав, що такий підхід дозволяє швидко виявити зони підвищеної теплопередачі та звернути на них особливу увагу в процесі обстеження. Саме за допомогою тепловізора на обстежених фасадах виявлені виражені системні теплові аномалії та дефекти стін, які знижують їх теплоізоляційні характеристики, у тому числі місця витіку внутрішнього повітря через незаповнені шви між стіновими блоками.

Оцінювання енергетичних показників обстеженої будівлі виконане розрахунковим шляхом за методикою норм [5, 6] з урахуванням результатів експериментального визначення опору теплопередачі елементів огорожень за методикою [4]. За результатами вимірювань термомітрометром у декількох точках отримані середні значення опору теплопередачі:

- зовнішні стіни – $1,24 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} < R_{q \text{ min}} = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;
- входні двері – $0,50 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} < R_{q \text{ min}} = 0,6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;
- вікна – $0,57 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт} < R_{q \text{ min}} = 0,75 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$.

Опори теплопередачі усіх конструкцій отримані меншими від мінімально допустимих значень $R_{q \text{ min}}$, які встановлені ДБН [2] для громадських будівель, розміщених у першій температурній зоні України. Невідповідність вимогам

норм вказує на недостатні теплоізоляційні властивості огорожувальних конструкцій та необхідність термомодернізації будівлі.

Згідно з вимогами норм [2, 6], основним показником для визначення класу енергетичної ефективності є енергетичні потреби будівлі на протязі опалювального періоду, які обчислюються з урахуванням таких факторів:

- тепловий потік через огорожувальні конструкції;
- втрати тепла на нагрівання вентиляційного повітря;
- втрати тепла за рахунок інфільтрації та вентиляції;
- побутові та виробничі надходження тепла;
- надходження тепла від сонячної радіації через вікна;
- теплова інерція огорожувальних конструкцій;
- авторегулювання подачі тепла в системах опалення.

У результаті розрахунків за методикою [6] отримані річні енергетичні потреби у розмірі $Q_{\text{рік}} = 585347$ кВт·год. З урахуванням вказаної вище площі опалюваних приміщень та опалюваного об'єму будівлі питомі витрати енергії на одиницю об'єму $EP = 55,7$ кВт·год/м³.

Клас енергетичної ефективності будівлі визначається за відсотком відхилення фактичних енергетичних потреб від максимально допустимого значення, встановленого ДБН [2] залежно від призначення, поверховості та температурної зони експлуатації будинку. Для навчальних закладів, які експлуатуються в першій температурній зоні України за [2] та підлягають термомодернізації, норми встановлюють максимально допустиме значення питомих енерговитрат на одиницю об'єму $EP_{\text{max}} = 1,25 \times 28 = 35$ кВт·год/м³. Відхилення фактичних енерговитрат від гранично допустимого значення становить 59%. Згідно з [2, 6], обстежена будівля школи має клас енергетичної ефективності F.

За результатами проведеного енергоаудиту розроблений енергетичний паспорт будівлі школи відповідно до вимог, структури та методики [2, 8]. Паспорт відображає реквізити будівлі, її функціональне призначення, тип і конструктивні рішення, теплотехнічні та енергетичні показники, характеристики інженерних систем та їх автоматизації, зведену таблицю обсягів енергоспоживання, а також висновки за результатами оцінки енергетичних параметрів будівлі. Зроблено загальний висновок щодо недостатнього рівня енергетичної ефективності обстеженої будівлі та необхідності проведення термомодернізації.

Заходи з термомодернізації обстеженої будівлі школи полягають в утепленні фасадів навісними вентиляльованими фасадними системами з утеплювачем із базальтової вати з середньою густиною 80 кг/м³ і товщиною 120 мм. Перед виконанням утеплення необхідно усунути виявлені при обстеженні дефекти та експлуатаційні пошкодження стін, зокрема:

- розібрати облицювання стін з керамічної плитки;
- заповнити шви між легкобетонними стіновими блоками;

– заповнити порожнини у вузлах примикання вікон і дверей.

Улаштування фасадної системи слід виконувати згідно з розробленим проектом, який передбачає додаткове утеплення стін, зовнішніх віконних відкосів та цоколю відповідно до вимог норм [9, 10]. За основу конструкції вентильованої фасадної системи прийняті технічні рішення, рекомендовані [11]. В якості додаткової теплоізоляції використані плити з базальтової вати з середньою густиною 75 кг/м^3 товщиною 100 мм.

Нижче показано, що запропоноване утеплення фасадів дозволяє обійтися без заміни вікон і зовнішніх дверей, які не відповідають чинним вимогам [2] щодо опору теплопередачі, але мають цілком задовільний технічний стан.

Оцінювання енергетичних показників термомодернізованої будівлі виконане розрахунковим шляхом за методикою норм [2, 5, 6]. Опір теплопередачі утеплених стін зростає до $3,37 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$, що відповідає вимогам норм [2] до громадських будівель $R_{q \text{ min}} = 3,3 \text{ м}^2 \cdot \text{К/Вт}$.

У результаті підвищення опору теплопередачі стін питомі енергопотребити на одиницю об'єму знижуються до $EP = 34,7 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^3$. При тому ж допустимому значенні питомих енерговитрат $EP_{\text{max}} = 35 \text{ кВт} \cdot \text{год/м}^3$ обчислене за викладеними вище принципами відхилення фактичних енерговитрат від гранично допустимого значення становить $-3,7\%$. Згідно з нормами [2, 6], будівля з додатковим фасадним утепленням відповідає класу енергетичної ефективності С, що відповідає мінімальним вимогам норм [2].

Висновки за результатами роботи:

1. Використання технічних засобів обстеження дозволяє легко виявити теплові аномалії та досить точно оцінити реальні теплові характеристики огорожувальних конструкцій.

2. Будівля школи, зведена у минулому столітті, має недостатні опори теплопередачі стін і світлопрозорих конструкцій, а також низькі показники енергетичної ефективності (клас F), а тому потребує термомодернізації.

3. Для доведення показників енергетичної ефективності будівлі до класу С, прийнятного для подальшої експлуатації, виявилось достатнім виконання фасадного утеплення без заміни існуючих металопластикових вікон.

1. Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» від 22.06.2017р. №2118-VIII / Відомості Верховної Ради (ВВР). – 2017. № 33. – Ст. 359.
2. Теплова ізоляція будівель: ДБН В.2.6-31:2016. – [Чинний від 2017–05-01]. – К.: Міністерство будівництва України, 2016. – 38 с. – (Державні будівельні норми України)
3. ДСТУ Б В.2.2-39:2016. Методи та етапи проведення енергетичного аудиту будівель. К.: Мінрегіон України, 2016. – 47 с.
4. ДСТУ Б В.2.6-101:2010. Конструкції будинків і споруд. Метод визначення опору теплопередачі огорожувальних конструкцій. – К.: Мінрегіонбуд України, 2010. – 84 с.
5. Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель: ДСТУ Б В.2.6-189:2013 – [Чинний від 01.01.2014]. - К.: Мінрегіон України, 2014. - 42 с. – (Державний стандарт України).

6. ДСТУ-Н Б А.2.2-13:2015 Енергетична ефективність будівель. Настанова з проведення енергетичної оцінки будівель – [Чинний від 01-01-2016] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2015. – 72 с.
 7. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 Будівельна кліматологія. – [Чинний від 01-11-2011] – К.: Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України, 2011. – 123 с.
 8. Настанова з розроблення та складання енергетичного паспорта будинків при новому будівництві та реконструкції [Текст]. ДСТУ Н Б А.2.2.5:2007.– Уведено вперше; [Чинний від 2008-07-01] – К.: Мінрегіонбуд України, 2008. – 44 с.
 9. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією. Вимоги до проектування: ДБН В.2.6-33:2018. – [Чинний від 01-12-2018]. – К.: Мінрегіон України, 2018. – 21 с.
 10. Конструкції будинків і споруд. Конструкції зовнішніх стін із фасадною теплоізоляцією та опорядженням індустріальними елементами з вентиляваним прошарком. Загальні технічні умови: ДСТУ Б В.2.6-35:2008 – [Чинний від 2009-06-01]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2009. – 25 с.
 11. Принципові технічні рішення термореконструкції фасадів житлових будинків 1960–1995 р. забудови [Текст] / НДІБК. – К., 2012. – 50 с.
1. Zakon Ukrainy «Pro enerhetychnu efektyvnist budivel» vid 22.06.2017. №2118-VIII / Vidomosti Verkhovnoi Rady (VVR). – 2017. № 33. – P. 359.
 2. Teplova izoliatsiia budivel: DBN V.2.6-31:2016. – [Chynnyi vid 2017–05-01]. – К.: Ministerstvo budivnytstva Ukrainy, 2016. – 38 p. – (Derzhavni budivelni normy Ukrainy)
 3. DSTU B V.2.2-39:2016. Metody ta etapy provedennia enerhetychnoho audytu budivel. К.: Minrehion Ukrainy, 2016. – 47 p.
 4. DSTU B V.2.6-101:2010. Konstruksii budynkiv i sporud. Metod vyznachennia oporu teploperedachi ohorodzhuvalnykh konstruksii. – К.: Minrehionbud Ukrainy, 2010. – 84 p.
 5. Metody vyboru teploizoliatsiinoho materialu dlia uteplennia budivel: DSTU B V.2.6-189:2013 – [Chynnyi vid 01.01.2014]. - К.: Minrehion Ukrainy, 2014. - 42 p. – (Derzhavnyi standart Ukrainy).
 6. DSTU-N B A.2.2-13:2015 Enerhetychna efektyvnist budivel. Nastanova z provedennia enerhetychnoi otsinky budivel – [Chynnyi vid 01-01-2016] – К.: Ministerstvo rehionalnogo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnogo hospodarstva Ukrainy, 2015. – 72 p.
 7. DSTU-N B V.1.1-27:2010 Budivelna klimatohiia. – [Chynnyi vid 01-11-2011] – К.: Ministerstvo rehionalnogo rozvytku, budivnytstva ta zhytlovo-komunalnogo hospodarstva Ukrainy, 2011. – 123 p.
 8. Nastanova z rozroblennia ta skladannia enerhetychnoho pasporta budynkiv pry novomu budivnytstvi ta rekonstruksii [Tekst]. DSTU N B A.2.2.5:2007.– Uvedeno vperше; [Chynnyi vid 2008-07-01] – К.: Minrehionbud Ukrainy, 2008. – 44 p.
 9. Konstruksii zovnishnikh stin iz fasadnoiu teploizoliatsiieiu. Vymohy do proektuvannia: DBN V.2.6-33:2018. – [Chynnyi vid 01-12-2018]. – К.: Minrehion Ukrainy, 2018. – 21 p.
 10. Konstruksii budynkiv i sporud. Konstruksii zovnishnikh stin iz fasadnoiu teploizoliatsiieiu ta oporiadzhenniam industrialnyimi elementami z ventylovanyim prosharkom. Zahalni tekhnichni umovy: DSTU B V.2.6-35:2008 – [Chynnyi vid 2009-06-01]. – К.: Minrehionbud Ukrainy, 2009. – 25 p.
 11. Prynysypovi tekhnichni rishennia termorekonstruksii fasadiv zhytlovykh budynkiv 1960–1995 r. zabudovy [Tekst] / NDIBK. – К., 2012. – 50 p.

**ЗАГАЛЬНА МЕТОДИКА РОЗРАХУНКУ БАГАТОРІВНЕВОГО
УТВОРЕННЯ НОРМАЛЬНИХ ТРІЩИН В ЗАЛІЗОБЕТОННИХ
ЕЛЕМЕНТАХ**

**GENERAL METHOD OF CALCULATION OF MULTILATERAL
FORMATION OF NORMAL CRACKS IN REINFORCED CONCRETE
ELEMENTS**

Ромашко-Майструк О. В., ст. викладач, ORCID: 0000-0003-3353-2268
(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

Romashko-Maistruk O. V., senior lecturer (National University of Water
Management and Nature Recourses Use, Rivne)

Розроблено загальну методику розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин, яка дозволяє з єдиних позицій: встановлювати момент появи нормальних тріщин незалежно від рівня їх утворення, визначати відстані між суміжними тріщинами та обчислювати ширину їх розкриття за схемою послідовного нерівномірного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури.

A general methodology for the calculation of multilevel formation and the detection of normal cracks has been developed. It allows from a single methodological standpoint: to establish the moment of normal cracks occurrence regardless of their level of formation, to determine the distances between adjacent cracks and to calculate the width of their opening according to the scheme of consistent uneven accumulation of mutual displacements of concrete and reinforcement. It is based on a generalized model of adhesion of reinforcement to concrete, so it remains acceptable for any stage of reinforced concrete elements deformation and can be equally successful in both engineering and software methods of calculating reinforced concrete elements and structures.

In the framework of the generalized model of reinforcement with concrete coupling, a universal criterion is proposed, corresponding to the appearance of not only the first crack, but also all other cracks without exception. In terms of physical content, this criterion is characterized by an imbalance between the maximum forces in the stretched concrete and the maximum efforts of the active adhesion of the reinforcement to the concrete in the area between adjacent cracks. This criterion made it possible to relate the distance between the cracks directly to the average adhesion stresses of the

reinforcement with concrete and to determine them on the basis of the equality of the reinforcement with concrete adhesion forces on either side of the intended crack of a certain level. It is proposed to calculate the width of the normal crack opening according to a simplified scheme, but from the standpoint of consistent accumulation of concrete and reinforcement mutual displacements (Thomas's hypothesis).

The technique of calculation of normal cracks multilevel formation is developed in accordance with the basic provisions of the deformation-force model of the reinforced concrete elements resistance to force influences. Therefore, it is also based on the generally recognized system of static, geometric and physical relationships of the mechanics of a deformed solid.

Ключові слова: Залізобетон, елементи, тріщини, критерії, крок, ширина розкриття

Reinforced concrete, elements, cracks, criteria, step, width of disclosure

Вступ. В теорії деформування залізобетонних елементів і конструкцій особлива увага завжди відводилась питанням тріщиностійкості, оскільки поза ними оцінити дійсний напружено-деформований стан зазначених елементів в експлуатаційних стадіях просто неможливо. Однак відтворення реального стану залізобетонних елементів у відповідних розрахунках і досі залишається доволі складним завданням. Проблема полягає не тільки в тому, що довжина окремих блоків, на які розділяється залізобетонний елемент тріщинами в процесі його деформування, є різною та залежить від дуже багатьох факторів. Запровадження деформаційних моделей з використанням дійсних діаграм деформування матеріалів в сучасну практику проектування залізобетонних елементів і конструкцій теж не гарантує достовірного відтворення реальних процесів багаторівневого утворення та розкриття тріщин.

Оскільки реальний процес утворення та розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах є багаторівневим та супроводжується порушенням взаємодії арматури з бетоном, то вкрай важливо, щоб загальна методика розрахунку тріщин будувалась на основі деякої універсальної моделі зчеплення арматури з бетоном.

Аналіз останніх досліджень. Проблемі тріщиностійкості залізобетонних елементів і конструкцій присвячено дуже багато робіт вітчизняних та закордонних вчених. Однак методик, що дозволяли б розраховувати основні параметри реального багаторівневого утворення нормальних тріщин, на сьогодні практично не існує. Лише в окремих роботах [1, 2] пропонується побудова таких методик на основі моделювання процесів зчеплення арматури з бетоном.

Відтворити в методиках розрахунку процеси зчеплення арматури з бетоном за допомогою діаграм їх взаємного зміщення вкрай складно, оскільки такі діаграми в процесі деформування залізобетонних елементів постійно

змінюються [3, 4, 5, 6] і їх безпосереднє інтегрування стає практично неможливим. Тому в методиках розрахунку взаємодію арматури з бетоном моделюють у найпростіший спосіб – за допомогою середніх напруження зчеплення. Однак реалізація цього способу в дослідженнях [2] викликає серйозне застереження щодо лінійності зв'язку між середніми напруженнями зчеплення арматури з бетоном та крайовими нормальними напруженнями в арматурному стержні незалежно від рівня деформування залізобетонного елемента.

Методика розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин за допомогою «двохконсольного» елемента [1] на сьогодні залишається вкрай складною для реалізації навіть за допомогою спеціальних програмних комплексів. Крім того, виникають певні застереження щодо трактування появи стискаючих напружень в зоні навколо досліджуваної тріщини.

Загалом розрахунок багаторівневого утворення нормальних тріщин можна було б виконувати числовими ітераційними способами [7, 8, 9, 10], що реалізуються тільки програмно за допомогою методу скінчених елементів. Але їх інженерна осяжність, як правило, втрачається, оскільки повністю або частково нівелюється фізична сутність процесів зчеплення арматури з бетоном та рівнів утворення тріщин в залізобетонному елементі.

Постановка мети і задач досліджень. Дані дослідження спрямовані на розробку загальної методики розрахунку послідовного багаторівневого утворення нормальних тріщин, яка була б справедливою для будь-якої стадії деформування залізобетонних елементів і конструкцій. Тому до вирішення поставлені наступні завдання:

- формування чітких критеріїв появи не тільки першої тріщини, але й всіх наступних тріщин за умови їх стадійного утворення;
- визначення відстані між суміжними тріщинами на найбільш напружених ділянках залізобетонного елемента;
- розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин з позицій послідовного нерівномірного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури.

Методика досліджень. В основу пропонованої методики розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин покладається математичне моделювання процесів деформування залізобетонних елементів і конструкцій з урахуванням загальних закономірностей зчеплення арматури з бетоном.

Результати досліджень. Загалом появу першої тріщини доцільно визначати за граничними деформаціями розтягнутого бетону ε_{ctu} , які слід фіксувати лише за екстремальним критерієм його міцності $dN_{ct} / d\varepsilon_{ct} = 0$, що випливає з критерію Ферма $dM_{ct} / d(1/r) = 0$. Згідно чинних норм [11, 12] їх також можна приймати рівними $\varepsilon_{ctu} = 2f_{ctk} / E_{c0}$. Що ж до виразу $dM_w / d\varepsilon = 0$ [2], то він не наділений якимось фізичним змістом, а тому не

може слугувати критерієм взагалі.

Але універсальним критерієм, що відповідає появі не тільки першої тріщини, але й всіх інших без виключення, є порушення рівноваги максимальних зусиль в розтягнутому бетоні та зусиль активного зчеплення арматури з бетоном на ділянці між суміжними тріщинами

$$N_{ct,max} = N_{bd,max} \quad (1)$$

Зазначене зусилля активного зчеплення пропонується обчислювати за нелінійною функцією середніх напружень цього зчеплення, обґрунтовану в [13, 14] наступним степеневим виразом

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / \sigma_y)^{1-1/\eta_s}, \quad (2)$$

де η_1 – коефіцієнт, що враховує профіль арматури [15] за критерієм Рема;

η_2 – коефіцієнт, що враховує вплив діаметру арматури [11, 12];

f_{ctk} – характеристичне значення міцності бетону на розтяг;

σ_{si} – напруження в арматурі у перерізі з тріщиною відповідного рівня;

σ_y – граничні напруження в арматурі ($\sigma_y = f_{yk}$);

$1/\eta_s$ – параметр інтенсивності зчеплення (для арматури періодичного профілю $\eta_s = \eta_1$, для арматури гладкого профілю $\eta_s = 6 \cdot \eta_1$).

Тоді, виходячи з (1) та (2), відстань між суміжними тріщинами першого рівня на рівні центру ваги розтягнутої арматури, при напруженнях в ній $\sigma_{si} = \varepsilon_{ctu} \cdot E_s$, можна визначити за формулою

$$s_{r1} = \frac{\varnothing_s}{4 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\varepsilon_{ctu} \cdot E_s / \sigma_y)^{1-1/\eta_s}} \cdot \frac{N_{ct,cr}}{A_s} \quad (3)$$

Для центрально розтягнутих елементів відстань між вказаними тріщинами стає обернено пропорційною до коефіцієнта його армування $\rho_{l,t} = A_s / N_{ct,cr}$.

Коли зважити, що відстані між тріщинами другого рівня зменшаться вдвічі $s_{r2} = s_{r1} / 2$, то середні напруження, за яких почнуть утворюватися ці тріщини, можна визначити за виразом

$$\sigma_{s2} = f_{yk} \cdot \left(\frac{\varnothing_s}{2 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot s_{r1} \cdot \rho_{l,t}} \right)^{\frac{\eta_s}{\eta_s-1}} \quad (4)$$

Залежність (2) залишається справедливою і для згинальних елементів, але максимальні зусилля в бетоні розтягнутої зони $N_{ct,cr} = f(\varepsilon_{ctu})$ необхідно розраховувати за допомогою загально визнаної системи рівнянь МДТТ [16] з доповненням її аналітичною залежністю діаграми стану залізобетонного елемента $M - 1/r$ та функцією граничних деформацій стиснутого бетону

$$\varepsilon_{cu} = f(\varepsilon_{si}, \rho_{li}, x_{si}, m_h, m_b).$$

$$\left. \begin{aligned} & \bullet \text{ статичних } M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ & \bullet \text{ геометричних } 1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s); \\ & \bullet \text{ фізичних } \sigma_c = f(\varepsilon_c), \quad \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \quad \sigma_s = f(\varepsilon_s) \end{aligned} \right\} (5)$$

Загалом для більшості згинальних елементів нормальні напруження в арматурі уздовж ділянок між тріщинами переважно є змінними. Тому середні напруження зчеплення на вказаних ділянках завжди будуть різними, як і різнитимуться між собою відстані між тріщинами наступних та попередніх рівнів. Універсальність критерію порушення зчеплення арматури з бетоном (1) якраз і полягає в тому, що він дозволяє пов'язати відстань між тріщинами безпосередньо з середніми напруженнями зчепленнями арматури з бетоном.

Наприклад, відстань між суміжними тріщинами другого та першого рівнів (рис. 1, а) можна визначити за нижченаведеними виразами

$$s_{r2,1} = \frac{s_{r1,1} \cdot \tau_{bm2,2}}{\tau_{bm2,1} + \tau_{bm2,2}}; \quad s_{r2,2} = \frac{s_{r1,1} \cdot \tau_{bm2,1}}{\tau_{bm2,1} + \tau_{bm2,2}}, \quad (6)$$

що є адекватними рівності зусиль зчеплення арматури з бетоном по обидві сторони від ймовірної тріщини другого рівня

$$s_{r2,1} = s_{r2,2} \cdot \tau_{bm2,2} / \tau_{bm2,1}. \quad (7)$$

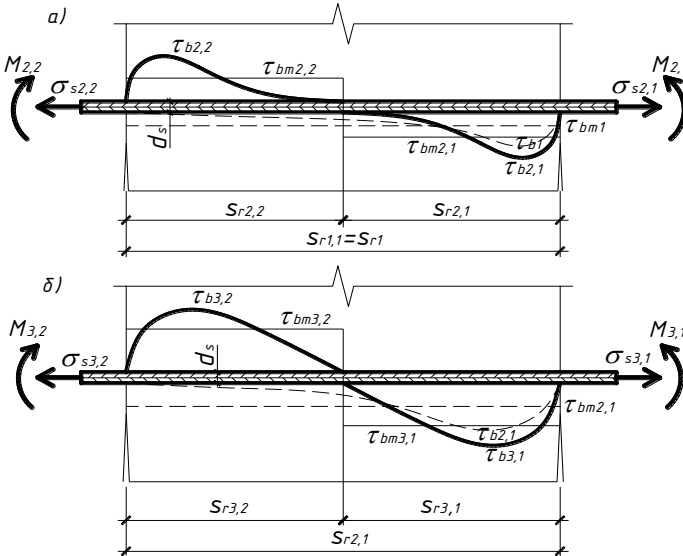


Рис. 1. Схема зміни напружень зчеплення арматури з бетоном після утворення тріщин першого (а) та другого (б) рівнів

Аналогічним чином пропонується визначати і всі інші відстані між суміжними тріщинами попередніх та наступних рівнів їхнього утворення. При цьому, деформування більшості згинальних залізобетонних елементів можна обмежувати 3-ма рівнями утворення тріщин (рис. 1, б).

У більшості випадків реальний розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин в залізобетонних елементах за відомою гіпотезою Томаса, з позицій послідовного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури

$$w_k = 2 \int_i^{0,5s_r} \varepsilon_\tau(z) dz, \quad (8)$$

і досі залишається декларативним.

Справа в тому, що пряме інтегрування виразу (8) здійснити практично неможливо, оскільки залежність взаємних зміщень арматури і бетону $\varepsilon_\tau(z) = \varepsilon_s(z) - \varepsilon_{ct}(z)$ є доволі складною та не може бути описана єдиною функцією. Тому розрахунок ширини розкриття нормальних тріщин пропонується виконувати за спрощеною схемою, залишаючись на позиціях послідовного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури.

Коли зважити, що в експлуатаційній стадії можуть утворюватися тріщини лише 1...2-го рівнів, то загальну ширину розкриття найбільш небезпечної нормальної тріщини пропонується обчислювати за формулою

$$w_k = s_{r,1} \cdot (\varepsilon_{sm,1} + \varepsilon_{sm,2} + \Delta\varepsilon_{sm,2} - \varepsilon_{ctm}) - s_{r,2,1} \cdot (\varepsilon_{sm,2} + \Delta\varepsilon_{sm,2} - \varepsilon_{ctm}), \quad (9)$$

де $\varepsilon_{sm,1}$ – приріст середніх відносних деформацій розтягнутої арматури на ділянці між суміжними тріщинами від початку завантаження до моменту утворення другої (наступної) тріщини першого рівня;

$\varepsilon_{sm,2}$ – теж саме від появи другої (наступної) тріщини першого рівня до моменту утворення тріщини другого рівня;

$\Delta\varepsilon_{sm,2}$ – теж саме від появи тріщини другого рівня до моменту досягнення експлуатаційного навантаження.

Варто зауважити, що в основу методики розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин, як і в основу самої деформаційно-силової моделі [16], закладається загально визнана система рівнянь МДГТ (5). Тому розрахунок багаторівневого утворення та розкриття тріщин рекомендується виконувати в наступній послідовності.

1. Граничні деформації розтягнутого бетону ε_{ctu} , що відповідають появі першої тріщини першого рівня, розраховують за допомогою екстремального критерію його міцності $dN_{ct} / d\varepsilon_{ct} = 0$ [16].

2. За деформаціями ε_{ctu} визначають максимально можливі зусилля в розтягнутому бетоні $N_{ct,max}$ [16] та обмежують ними максимальні зусилля зчеплення арматури з бетоном $N_{bd,max}$ [17].

3. Визначають середні напруження зчеплення арматури з бетоном на ділянці між першою та ймовірною другою (суміжною) тріщиною першого рівня за (2).

4. За формулою (3) обчислюють відстані між вищевказаними тріщинами першого рівня.

5. Відстані між суміжними тріщинами 1-го та 2-го рівнів розраховують за виразами (6). За необхідності аналогічним чином обчислюють відстані між суміжними тріщинами 2-го та 3-го рівнів.

6. Середні деформації арматури $\varepsilon_{sm,i}$ на ділянках між суміжними тріщинами визначають в елементах: центрально розтягнутих – на підставі середніх напружень (4); згинальних – на підставі діаграм стану $M - 1/r$ за кривою в осередненому перерізі $\varepsilon_{sm,i} = f(1/r)$.

7. Середні деформації розтягнутого бетону на ділянках між суміжними тріщинами ε_{ctm} обчислюють за [16].

8. Повну ширину дворівневого розкриття найбільш небезпечної тріщини розраховують за (9) або в загальному випадку за [17].

Висновки. Таким чином, розроблений метод розрахунку дозволяє з єдиних методологічних позицій встановлювати момент появи тріщин незалежно від рівня їх утворення, визначати відстані між суміжними тріщинами та обчислювати ширину їх розкриття за схемою послідовного нерівномірного накопичення взаємних зміщень бетону і арматури. А оскільки в його основу покладено узагальнену модель зчеплення арматури з бетоном, то він залишається прийнятним для будь-якої стадії деформування залізобетонних елементів та може з однаковим успіхом реалізовуватись як в інженерних, так і в програмних методиках розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій.

1. Бондаренко В. М., Колчунов В. И. Расчётные модели силового сопротивления железобетона: монография. Москва: «АСВ», 2004. 472 с.

Bondarenko V. M., Kolchunov V. I. Raschyotny`e modeli silovogo soprotivleniya zhelezobetona: monografi`ya. Moskva: «ASV», 2004. 472 s.

2. Кочкаръов Д. В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Полтава, 2018. 44 с.

Kochkarov D. V. Neliniyniy opir zalizobetonnykh elementiv i konstruktzii silovym vplyvam: avtoref. dys. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01. Poltava, 2018. 44 s.

3. Mirza S. A. and Houde J. Study of Bond-Slip Relationships in Reinforced Concrete. *ACI Journal*. January 1979. Vol. 76, No.1. P. 19-46.

4. Eligehausen R., Popov E. P. and Bertero V. V. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Berkeley: Earthquake Engineering Research Center of California University, 1983. 169 p.

5. Shima H., Chou L.-L. and Okamura H. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. *Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University*. 1987. Vol. XXXIX, No. 2. P. 133-194.

6. Harajli M. H., Hout M.A. and Jalkh W. Local bond stress-slip behavior of reinforced bars

embedded in plain and fiber concrete. *ACI Materials Journal*. 1995. Vol. 92, No. 4. P. 343-353.

7. Карпенко Н. И. Общие модели механики железобетона. Москва: Стройиздат, 1996. 416 с.
Karpenko N. I. Obshhie modeli mekhaniki zhelezobetona. Moskva: Strojizdat, 1996. 416 s.

8. Веселов А. А. Нелинейная теория сцепления арматуры с бетоном и ее приложения: дис. д-ра техн. наук: 05.23.01 / Санкт-Петербургский гос. арх.-строит. ун-т. Санкт-Петербург, 2000. 320 с.

Veselov A. A. Nelinejnaya teoriya szcepleniya armatury s betonom i ee prilozheniya: dis. ... d-ra tekhn. nauk: 05.23.01 / Sankt-Peterburgskij gos. arkh.-stroit. un-t. Sankt-Peterburg, 2000. 320 s.

9. Конечно-элементное моделирование процессов неупругого деформирования и разрушения элементов железобетонных конструкций / А. В. Бенин и др. *Морские интеллектуальные технологии*. 2011. №3. С. 105-108.

Konechno-e`lementnoe modelirovanie proccessov neuprugogo deformirovaniya i razrusheniya e`lementov zhelezobetonn`kh konstrukcij / A. V. Benin i dr. *Morskie intellektual`ny`e tekhnologii*. 2011. No. 3. S. 105-108.

10. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment) / I. N. Shardakov et al. *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2016. Vol. 38. P. 339-350.

11. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. [Чинний від 01.06.11]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с. (Національний стандарт України).

DSTU B V.2.6-156: 2010. Konstruktsii budynkiv i sporud. Betonni ta zalizobetonni konstruktsii z vazhkohto betonu. Pravyla proektuvannia. [Chynnyi vid 01.06.11]. Kyiv: Minrehionbud Ukrainy, 2011. 123 s. (Natsionalnyi standart Ukrainy).

12. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings. [Final Draft, December 2004]. Brussels: CEN. 2004. 225 p. (Європейський стандарт).

13. Ромашко О. В., Ромашко В. М. Щодо оцінювання зчеплення арматури з бетоном. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2018. Вип. 179. С. 92-99.

Romashko O. V., Romashko V. M. Shchodo otsiniuvannia zcheplenniya armatury z betonom. *Zb. nauk. prats UDUZT*. 2018. Vyp. 179. S. 92-99.

14. Ромашко В. М., Ромашко О. В. Розрахунок тріщиностійкості залізобетонних елементів з урахуванням рівнів утворення нормальних тріщин. *Зб. наук. праць УДУЗТ*. 2018. Вип. 181. С. 58-65.

Romashko V. M., Romashko O. V. Rozrakhunok trishchynostiikosti zalizobetonnkh elementiv z urakhuvanniam rivniv utvorennia normalnykh trishchyn. *Zb. nauk. prats UDUZT*. 2018. Vyp. 181. S. 58-65..

15. Rehm G. The fundamental law of bond. *Proceedings of the symposium on bond and crack formation in reinforced concrete*. Stockholm: RILEM. 1957. Vol. 2. P. 491-498.

16. Ромашко В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону і залізобетону: монографія. Рівне: О. Зень, 2016. 424 с.

Romashko V. M. Deformatsiino-sylova model oporu betonu i zalizobetonu: monohrafiia. Rivne: O. Zen, 2016. 424 s.

17. Ромашко О. В., Ромашко В. М., Журавський О. Д. Узагальнена модель зчеплення арматури з бетоном. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць*. Рівне: НУВГП, 2019. Вип. 37. С. 214-221.

Romashko O. V., Romashko V. M., Zhuravskiy O. D. Uzahalnena model zcheplenniya armatury z betonom. *Resursoekonomni materialy, konstruktsii, budivli ta sporudy: zb. nauk. prats*. Rivne: NUVHP, 2019. Vyp. 37. S. 214-221.

ЗМІСТ

		Стор.
1.	ВИДАТНИЙ ВЧЕНИЙ – МАТЕРІАЛОЗНАВЕЦЬ.....	4
2.	Кафедрі технології будівельних виробів і матеріалознавства НУБГП 35 років.....	7
3.	Творчий доробок колективу кафедри ТБВіМ за 35 років.....	12
	Матеріали XI науково-практичного семінару «СТРУКТУРА, ВЛАСТИВОСТІ ТА СКЛАД БЕТОНУ».....	22
4.	Дворкін Л.Й. Високоміцні бетони із застосуванням золошлакових матеріалів.....	23
5.	Бабич Є.М. Діаграми деформування бетонів нового покоління на розтяг при згині та їхні механічні характеристики.....	45
6.	Кочарьов Д.В. Філіпчук С.Ф. Безусяк О.В. Вплив комплексної добавки суперпластифікатору та метакаоліну на усадкові деформації цементного каменю	56
7.	Лушнікова Н.В. Бсліченко О.А. Толмачов С.М. Дослідження фізико-хімічних властивостей водних суспензій мікронаповнювачів з суперпластифікаторами.....	66
8.	Бойко О. В. Корозія арматури у лужних бетонах: проблеми і шляхи запобігання.....	78
9.	Бондаренко А.С. Ніздрваті бетони на основі тонкодисперсних відходів гірничозбагачувальних комбінатів..	84
10.	Бордюженко О.М. Реакційно-порошкові бетони армовані сітками – аналогами дисперсної арматури... ..	90
11.	Дворкін Л.Й. Коробко О.А. Механізми багатоосередкового структуроутворення будівельних композитів.....	98
12.	Суханов В.Г. Модифікований ресурсоекономний штучний камінь для виробництва арматурного декору і стінових виробів на основі гіпсової в'язучої речовини.....	106
13.	Гасан Ю.Г. Тарасевич В. І. Залежність термінів тужавлення лужних цементів від аніонного складу лужного компоненту.....	113
14.	Дроздова О.В. Гузій С.Г. Лашівський В.В. Дослідження реологічних та деформативних характеристик алюмосилікатних адгезивів для склеювання виробів із масивів сосни.....	121

15.	Дворкін Л.Й. Степасюк Ю.О.	Швидкотвердунчі розчинові композиції для 3d будівельного принтеру.....	130
16.	Дерев'янок В. Н. Кушнерова Л. О. Мороз Л. В. Мороз В. Ю.	Технології та використання наносистем у виробництві будівельних матеріалів.....	140
17.	Довгань О.Д. Вировой В.М. Довгань П.М.	Водопоглинання, як функція складів декоративних бетонів.....	148
18.	Житковський В.В. Дворкін Л.Й. Степасюк Ю.О.	Вплив різних видів мінеральних добавок на властивості реакційно-порошкового бетону.....	161
19.	Іваничко В.В. Ковальчук О. Ю.	Вплив виду в'язучої речовини на процеси структуроутворення бетонів із використанням активного заповнювача.....	169
20.	Каганов В.О.	Нові тенденції при вібропресуванні кольорових наджорстких бетонних сумішей	177
21.	Ковальчук А.В. Константиновський, О.П. Руденко І.І.	Ефективність використання повітровтягувальних добавок в штукатурках спеціального призначення.....	185
22.	Костюк Т.О. Бондаренко Д.О. Деденьова О.Б, Плахотніков К.В. Наливайко Т.Т.	Формування мікроструктури теплоізоляційного тонкошарового покриття на портландцементі, що вміщує порожнисті алюмосилікатні та скляні мікросфери.....	194
23.	Кровяков С.О. Петричко С.М.	Довговічність декоративних керамзитобетонів для тонкостінних конструкцій гідротехнічних споруд.....	203
24.	Лаповська С.Д.	Щодо застосування базальтової мікрофібри для підвищення міцнісних характеристик теплоізоляційного автоклавного газобетону	214
25.	Марчук В.В. Дворкін Л.Й. Марчук Б.В.	Гідроізоляційні суміші на основі реакційно-порошкових бетонів.....	226
26.	Парута В.А. Лавренюк Л.І. Гніп О.П. Гриньова І.І.	Формування контактної зони «кладка-штукатурні покриття».....	233
27.	Пушкарьова К.К. Каверин К.О.	Оцінка впливу комплексних органічно-кременеземистих добавок на процеси	242

	структурування у часі цементних композицій.....	
28.	Рунова Р.Ф. Руденко І.І. Товстоніс В.В. Чудновський С.М. Погореляк О.А.	Методологія впровадження нових добавок для бетонів..... 251
29.	Саницький М.А. Кропивницька Т.П. Рихліцька О.В. Яніцький О.Б.	Швидкотверднучі клінкер-ефективні бетони 258
30.	Сопов В.П. Шишко Н.С.	Фотокаталітичний бетон як матеріал для «зеленого» будівництва..... 267
31.	Сторчай Н. С. Савін Ю. Л. Волнянська І. П.	Науково-технічне обґрунтування використання мінеральних дисперсних систем техногенного походження 277
32.	Шейніч Л.О. Миколаєць М.Г. Крилов Є.О. Мудрик М.С.	Спеціальні бетони для енергетичного будівництва..... 283
33.	Шпірцько М. В. Трофимова І. А.	Дослідження впливу тонкомеленого доломіту на гранулометричний склад цементів та їх міцності..... 291
34.	L. Baldassari E. Moscardini L. Toro PG. Schiavi P. Altimari F. Pagnanelli F. Cornaggia	Інноваційний процес утилізації первинних лі-батарей: проект life libat..... 300
35.	Stanisław Fic Andrzej Szewczak	The influence of additives containing free cao on the properties of the cement paste 306
36.	Khatib J.M. Jahami A.H., Bakri A., Alaina R. Lushnikova N.V.	Study of the influence of waste plastic straw fibers on concrete properties..... 313

**ДОСЛІДЖЕННЯ, ПРОЕКТУВАННЯ ТА ЗАПРОВАДЖЕННЯ
РЕСУРСОЕКОНОМНИХ КОНСТРУКЦІЙ, БУДІВЕЛЬ ТА СПОРУД**

38.	Гомон С.С. Гомон П.С.	Побудова дійсних діаграм механічного стану деревини « σ - u » суцільного перерізу ялини та берези за жорсткого режиму випробувань.....	321
39.	Настоящий В.А. Пашинський В.А. Пашинський М.В. Джирма С.О.	Досвід розрахунково-експериментального оцінювання енергетичних показників будівлі школи.....	331
40.	Ромашко-Майструк О. В.	Загальна методика розрахунку багаторівневого утворення нормальних тріщин в залізобетонних елементах.....	339
		Зміст.....	347