

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»**

**Гуняк Олексій Миколайович**



УДК 691.328

**ВИСОКОМІЦНІ БЕТОНИ ТРАНСПОРТНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**  
**З ПІДВИЩЕНОЮ ДОВГОВІЧНІСТЮ**

05.23.05 – Будівельні матеріали та вироби

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів - 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Національному університеті «Львівська політехніка» Міністерства освіти і науки України

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Соболь Христина Степанівна,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
професор кафедри автомобільних доріг та мостів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Толмачов Сергій Миколайович,**  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет,  
професор кафедри технологій дорожньо-будівельних  
матеріалів і хімії;

кандидат технічних наук, доцент  
**Лушнікова Наталія Валеріївна,**  
Національний університет водного господарства та  
природокористування,  
доцент кафедри архітектури та середовищного дизайну

Захист відбудеться «23» грудня 2019 р. о 13<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17 у Національному університеті «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Карпінського, буд. 6 (II-й навчальний корпус), ауд. 212.

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Національного університету «Львівська політехніка» за адресою: 79013, м. Львів, вул. Професорська, буд. 1.

Автореферат розісланий «\_\_» листопада 2019 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 35.052.17



П. Ф. Холод

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Розвиток транспортної інфраструктури передбачає будівництво сучасних цементобетонних автомобільних і аеродромних покриттів з високими експлуатаційними характеристиками і є актуальним завданням для інтеграції України в європейську транспортну систему. Значний приріст інтенсивності і вантажонапруженості руху в останні роки вказує на необхідність застосування у дорожніх покриттях матеріалу із підвищеними механічними характеристиками – високоміцного бетону. Його використання надає низку вагомих переваг: зниження витрати компонентів за рахунок зменшення товщини конструкцій, підвищення ранньої міцності, щільності та зносостійкості бетону. Проте досягнення високих фізико-механічних характеристик цементобетону нерозривно пов'язано із зниженням водоцементного відношення і, як наслідок, з розвитком самообезводнення, що викликає зростання деформацій усадки цементного каменю, активізує мікротріщиноутворення, підвищує пористість і проникність бетону та значно знижує його експлуатаційні властивості та термін служби. У зв'язку з цим виникає проблема підвищення довговічності високоміцних бетонів транспортного призначення, одним із шляхів вирішення якої є використання внутрішнього догляду за бетоном. Він спрямований на забезпечення умов для розвитку процесів гідратації і структуроутворення цементного каменю за рахунок введення до складу бетону пористих компонентів, що регулюють водовміст.

Узагальнення результатів досліджень в області технології бетонів свідчить, що такі показники довговічності, як водонепроникність, морозо- і хімічна стійкість, а також тріщиностійкість безпосередньо пов'язані з поровою структурою бетонів. Тому нові прийоми і способи регулювання характеру пористості бетону на мікро- та мезоструктурному рівнях відкривають додаткові можливості підвищення його довговічності. Одним із напрямків впорядкування порової структури бетону є оптимізація розподілення зерен за розмірами для одержання неперервного гранулометричного складу за рахунок використання компенсуючих дисперсних компонентів.

Отже, розроблення і використання високоміцних бетонів транспортного призначення з впорядкованою поровою структурою та регульованим внутрішнім вологовмістом, що забезпечує підвищення будівельно-експлуатаційних властивостей та довговічності бетону, є актуальним завданням бетонознавства в напрямку реалізації національної транспортної стратегії України.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами.** Тема дисертації є складовою частиною науково-дослідної роботи кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка» і виконувалась в межах теми «Розробка ефективних технологій і матеріалів для будівництва та ремонту дорожніх одягів» (номер держреєстрації 0112U003779).

**Мета роботи та завдання дослідження.** Розроблення високоміцних цементобетонів транспортного призначення з покращеними мікро- та мезоструктурою та підвищеною довговічністю шляхом модифікування

пуцолановими полідисперсними компонентами та добавками пластифікувально-повітровтягувальної дії.

Для досягнення поставленої мети в роботі необхідно вирішити наступні завдання:

- провести критичний аналіз теоретичних уявлень та експериментальних даних щодо шляхів підвищення міцності та довговічності бетонів транспортного призначення;
- встановити особливості впливу пуцоланічних мінеральних компонентів різної дисперсності на мезоструктуру бетонів;
- порівняти пуцоланову активність пористих мінеральних компонентів різної дисперсності та дослідити ефективність їх використання як додаткових цементуючих матеріалів;
- комплексом методів фізико-хімічного аналізу встановити характер формування мікроструктури бетонів з вмістом пуцоланових компонентів та пластфікувальних і повітровтягувальних добавок;
- розробити та оптимізувати за критеріями міцності склади цементних бетонів на основі сумішей різної рухливості для транспортного будівництва із вмістом полідисперсних пористих пуцоланічних добавок та визначити їх фізико-механічні та будівельно-експлуатаційні властивості;
- встановити можливість використання пористих полідисперсних компонентів для забезпечення внутрішнього догляду за бетонами та нівелювання негативного ефекту самообезводнення;
- провести дослідно-промислове впровадження розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення та надати техніко-економічне обґрунтування їх ефективності.

**Об'єкт дослідження** – процеси спрямованого регулювання мікро- та мезоструктури високоміцних бетонів транспортного призначення та особливості формування комплексу їх фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей.

**Предмет дослідження** – високоміцні бетони транспортного призначення з покращеною мікро- і мезоструктурою та підвищеними показниками тріщиностійкості та довговічності, отримані шляхом введення модифікувальних полідисперсних компонентів та хімічних добавок.

**Методи дослідження.** Експериментальні результати отримані із використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу, зокрема лазерної гранулометрії, ртутної порометрії, комп'ютерної мікротомографії, рентгенівської дифрактометрії, електронної мікроскопії з мікрозондовим аналізом. Визначення фізичних, фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей матеріалів і виробів здійснювали згідно з чинною нормативно-технічною документацією та загальноприйнятими методиками. Оптимізацію складів високоміцних бетонів проведено із застосуванням експериментально-статистичних методів планування експерименту.

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- теоретично обґрунтована та експериментально підтверджена можливість одержання високоміцних бетонів транспортного призначення та регулювання їх

властивостей шляхом введення полідисперсного цеолітового компоненту та хімічних добавок пластифікувально-повітровтягувальної дії;

- вперше встановлена можливість використання полідисперсного цеолітового компонента для реалізації внутрішнього догляду за бетоном, особливо за низьких значень В/Ц та малій товщині конструкцій шляхом створення внутрішнього резерву води, іммобілізованої в процесі перемішування внутрішньою структурою цеоліту з численними мікропорами, каналами і пустотами, що сприяє розвитку процесів гідратації та структуроутворення, запобігає самообезводненню бетону;

- встановлена багатофункціональна роль полідисперсного цеолітового компоненту, який оптимізує розподілення зерен за розміром в напрямку досягнення неперервного гранулометричного складу та забезпечує формування компактної мезоструктури бетону; одночасно є пуцоланічною добавкою, що відіграє активну роль у формуванні мікроструктури, а також, завдяки розвинутій внутрішньокристалічній системі порових каналів, адсорбує воду, виділення якої не супроводжується структурними змінами та об'ємними деформаціями цементної матриці та використовується для подальшої гідратації;

- розроблені наукові засади ролі цеоліту різної дисперсності в процесах структуроутворення для одержання щільної однорідної структури цементної матриці з покращеними структурно-механічними властивостями, насиченої субмікроструктурними голчасто-волокнистими низькоосновними гідросилікатами кальцію CSH (I);

- отримало подальший розвиток дослідження закономірностей формування упорядкованого капілярного простору бетону з регульованим водно-повітряним співвідношенням за рахунок утворення щільної закритої дрібнопористої структури цементної матриці та рівномірно розподіленим в ній втягнутим повітрям, що досягається внаслідок синергічної взаємодії цеолітового полідисперсного компоненту і добавок пластифікуюче-повітровтягувальної дії, та забезпечує підвищення непроникності бетону, його стійкість до корозійних та несприятливих температурно-вологісних впливів, гальмування процесів мікротріщиноутворення та створення опору руху магістральних тріщин, підвищуючи довговічність бетону.

### **Практичне значення одержаних результатів**

- розроблено бетони транспортного призначення з впорядкованою поровою структурою, підвищеними показниками довговічності (марка за морозостійкістю не менше F200, коефіцієнт корозійної стійкості  $K_c^{3T}=1,23$ , глибина проникнення води  $WPD=3,5$  мм), тріщиностійкості (загальні питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування  $G_F=657,37$  Дж/м<sup>2</sup>) та міцності на розтяг при згині ( $f_{ctb}=10,1$  МПа), а також із компенсованим негативним впливом самообезводнення бетону за низьких значень водоцементного відношення;

- проведено дослідно-промислову апробацію розроблених бетонів під час влаштування цементобетонного покриття проїздів на території ТОВ «Дрогобицький бетонний завод». Результати випробувань підтвердили досягнення підвищених характеристик міцності та довговічності за умови забезпечення необхідної рухливості бетонної суміші;

- впроваджені технологічні рішення з використанням полідисперсного цеолітового компоненту та хімічних добавок у складі бетону при виготовленні виробів бетонних тротуарних неармованих на ПП «Застава» (м. Червоноград Львівської обл.);

- результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» у викладанні дисциплін «Фізико-хімічна механіка дорожньо-будівельних матеріалів», «Виробничі підприємства транспортного будівництва та дорожньо-будівельні матеріали» для бакалаврів і магістрів за освітньою програмою «Автомобільні дороги та аеродроми».

**Особистий внесок здобувача** полягає в аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень, обробленні та інтерпретації одержаних даних.

Постановка завдання, планування програми досліджень, формулювання основних положень та висновків здійснювалося під керівництвом наукового керівника – д.т.н., проф. Соболь Х.С., за наукового консультування к.т.н., доцента Марківа Т.Є.

Результати наукових досліджень, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – дослідження впливу дисперсності пуцоланічних компонентів на фізико-механічні властивості бетонів та особливості внутрішнього догляду; [2] – вивчення властивостей виробів бетонних тротуарних неармованих у різних умовах тверднення; [3] - дослідження впливу пуцоланічних добавок на технологічні властивості модифікованих бетонних сумішей; [4] - аналіз особливостей використання дисперсних компонентів у бетонах; [5, 15] - дослідження впливу хімічних добавок на фізико-механічні та експлуатаційні властивості бетонів; [6] – проведення факторного експерименту; [7, 11, 14] – дослідження фізико-механічних характеристик цементів з добавками; [8] – вивчення впливу цеолітового полідисперсного компоненту на технологічні властивості модифікованих цементних розчинів; [9, 10, 13] – дослідження тріщиностійкості та міцності модифікованих бетонів; [12] – вивчення впливу цеолітового компоненту на експлуатаційні характеристики цементобетонів.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати роботи доповідались й обговорювались на таких конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Ефективні цеолітовмісні матеріали, їх властивості та особливості застосування» (м. Жовква, 21-23 квітня 2015 року); Международная научно-практическая конференция "Эффективные технологические решения в строительстве с использованием бетонов нового поколения" (Харків, 14-15 жовтня 2015 року; VI Міжнародна конференція SIKA по бетонам (Київ, 17-18 березня 2016 р.); III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів» (Львів, 05-08 вересня 2016 року); Міжнародна конференція «Сучасні методи і технології проектування, будівництва, експлуатації автомобільних доріг, споруд на них та управління проектами їх розвитку» (м. Київ, 22-25 листопада 2016 року); The 10th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites (24th to 29th of June 2018 in Cracow, Poland); 20. Internationale Baustofftagung Ibausil, (м. Веймар, Федеративна республіка Німеччина, 12-14 вересня 2018 року); XVII International Scientific Conference Current

Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv - Košice – Rzeszów (Львів, 11 - 13 вересня 2019 року).

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 15 наукових праць, з них 5 статей у наукових фахових виданнях України, 3 – у наукових періодичних виданнях інших держав, 1 – у виданні, що включене до міжнародної наукометричної бази даних Scopus і 6 публікацій у матеріалах міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 136 найменувань та 3 додатків. Робота викладена на 159 сторінках, у тому числі 134 сторінки основного тексту, 32 таблиці, 48 рисунків, 15 сторінок списку використаних джерел та 10 сторінок додатків.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність дисертаційної роботи, сформульовано мету та завдання дослідження. Наведено отримані автором основні положення, що мають наукову новизну та практичну цінність.

У **першому розділі** проведено критичний огляд літературних джерел, пов'язаних з технологічними особливостями отримання високоміцних бетонів, шляхами підвищення їх довговічності, а також визначено теоретичні передумови дослідження.

Високоміцні бетони (High strength concrete - HSC) знайшли широке застосування у практиці транспортного будівництва для зменшення товщини мостових конструкцій, верхніх шарів дорожнього одягу та промислових підлог.

Для високоміцних бетонів характерними є низькі значення водоцементного відношення, що при підвищеній витраті цементу, наявності в їх складі активних мінеральних добавок з високою водопотребою, введення в бетонні суміші суперпластифікаторів, викликає нестачу води замішування для нормального перебігу реакцій гідратації. В результаті відбувається відтягування цементом води з порового простору, розвивається самообезводнення структури бетону та виникають деформації усадки. Ця проблема особливо важлива в теплу пору року при зведенні конструкцій з великою площею поверхні, що висихає, зокрема транспортного призначення – покриття автомобільних доріг та аеродромів, прогонових будов мостів, елементів штучних споруд.

Традиційними методами зниження усадки є зовнішній догляд за бетоном – покриття вологоутримуючими та плівкоутворюючими речовинами, туманні завіси, та ін. Проте такі заходи не дають змоги контролювати самообезводнення бетону за низьких значень водоцементного відношення, яке спричиняє внутрішні деформації та активне тріщиноутворення бетону, викликає зниження його міцності, тріщиностійкості, непроникності та довговічності.

Концепція «внутрішнього догляду» за бетоном, висунута Р. Philleo і розвинена D. Bentz, К. Kovler, О. Jensen, Р. Lura, передбачає забезпечення необхідного внутрішнього вологовмісту за рахунок введення в бетонну суміш спеціальних добавок, зокрема водонасичених пористих заповнювачів (LWA – Light Weight

Aggregate) та полімерних суперабсорбентів (SAP-Super Absorbent Polymers), здатних віддавати вологу в матрицю бетону для підтримки процесів гідратації цементу. Основним недоліком запропонованих добавок є суттєве зниження механічних характеристик бетону.

До матеріалів, які мають високу пористість і можуть бути використані для внутрішнього догляду належать цеолітовий туф, структура якого характеризується внутрішньокристалічною пористістю і може зворотньо змінювати вміст адсорбованої води, а також спучений перліт, для якого властива розвинута відкрита пористість. Беручи до уваги, що цеолітовий туф і перліт володіють пуцоланічними властивостями, їх використання для одержання високоміцних бетонів має очевидні переваги. Так, в роботах Х.С. Соболя, Р.Ф. Рунової, С.Й. Солодкого, К.К. Пушкарьової, С. Bilim, D. Jana, E. Vejmelkova, B. Ahmadi, M. Shekarchi, L. Yu, T.K. Erdem підтверджується ефективність застосування тонкодисперсних цеоліту та перліту як додаткових цементуючих матеріалів. Їх присутність забезпечує зростання міцності бетону у пізні терміни тверднення, зниження тепловиділення при гідратації та підвищення корозійної стійкості і довговічності.

Численні сучасні дослідження вітчизняних (І.П. Гамеляк, В.І. Гоц, Л.Й. Дворкін, П.В. Кривенко, А.М. Плугін, Р.Ф. Рунова, М.А. Саницький, С.Й. Солодкий, С.М. Толмачов, Л.О. Шейніч) та зарубіжних вчених (Р.С. Aitcin, М.А. Caldarone Р.К. Mehta, А. Neville, М. Pigeon, J. Stark) свідчать, що при розв'язанні проблеми довговічності цементобетону необхідно враховувати комплекс експлуатаційних та природно-кліматичних впливів, а також властивості вихідних матеріалів, компонентний склад в'язучих, технологічні чинники. Особливої уваги також потребує питання забезпечення тріщиностійкості, оскільки процес руйнування цементобетону під дією зовнішніх впливів відбувається шляхом утворення та поширення в його структурі тріщин.

Аналіз відомих закономірностей формування структури будівельних композитів дає змогу висунути гіпотезу про доцільність розроблення високоміцних бетонів транспортного призначення та дослідження особливостей формування їх фізико-механічних та будівельно-експлуатаційних властивостей за рахунок комплексного модифікування пористими пуцолановими компонентами і добавками пластифікувально-повітровтягувальної дії для реалізації функції внутрішнього догляду, направленою на формування впорядкованої порової структури на мікро- та мезорівні для досягнення підвищених характеристик міцності, тріщиностійкості та довговічності бетону.

**У другому розділі** наведено характеристики вихідних матеріалів та описано основні методики досліджень, застосовані в роботі.

Для проведення експериментальних досліджень в дисертаційній роботі використані портландцемент ПЦ І-500 виробництва ПАТ «Волиньцемент», кварцовий пісок Жовківського кар'єру Львівської області ( $M_{кр}=1,9$ ) та гранітний щебінь кар'єру м. Коростень Житомирської області суміші фракцій 5-10 та 10-20 мм.

Як пористі активні мінеральні компоненти використовувались цеолітовий туф клиноптилолітового типу Сокирницького родовища Закарпатської області та спучений перліт виробництва ТОВ «Перліт-Стандарт» різної дисперсності.

Для пластифікації бетонної суміші та створення замкнутої мікропористості



використовували відповідно суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Sika Viscocrete 5320 та висококонцентровану повітровтягувальну добавку на основі вінсольних смол Sikanol A.

Рентгенофазовий аналіз проводили за методом порошків на дифрактометрі ДРОН-2М, дериватограми знімали за допомогою приладу OD-1500Q, хімічні склади досліджували рентгеноспектрометром SEM FEI Quanta 250 з обладнанням для мікрофотографії FEG.

Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні характеристики розроблених бетонів та бетонних виробів на їх основі визначали згідно діючих стандартів та загальноприйнятих методик. Оптимізацію складів розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення за критеріями міцності проводили за допомогою методів експериментально-статистичного моделювання з використанням дисоціативно-крокового методу оптимізації.

Для визначення пористості бетонів використовували ртутний поромір Micrometrics Autopore IV 9605, а також мікротомограф SkyScan 1173. Внутрішню вологість бетону визначали на зразках-кубах з ребром 10 см за допомогою вологоміра, який був розміщений у висвердленому герметично закритому отворі. Покази вологоміра реєстрували з періодичністю 2 доби.

**Третій розділ** присвячений дослідженням особливостей формування мезо- та мікроструктури високоміцних бетонів з використанням пуцоланових пористих компонентів різної дисперсності.

Як пуцоланові активні мінеральні добавки використовувались тонкодисперсні цеолітовий та перлітовий компоненти (ЦТК і ПТК), зерновий склад яких був співрозмірний із зерновим складом цементу ПЦ I – 500 (рис. 1, а, б), а також полідисперсні цеолітовий та перлітовий компоненти (ЦПК і ППК) (рис. 1, в). Як видно з рис. 1.в, максимум на диференційних кривих розподілу частинок

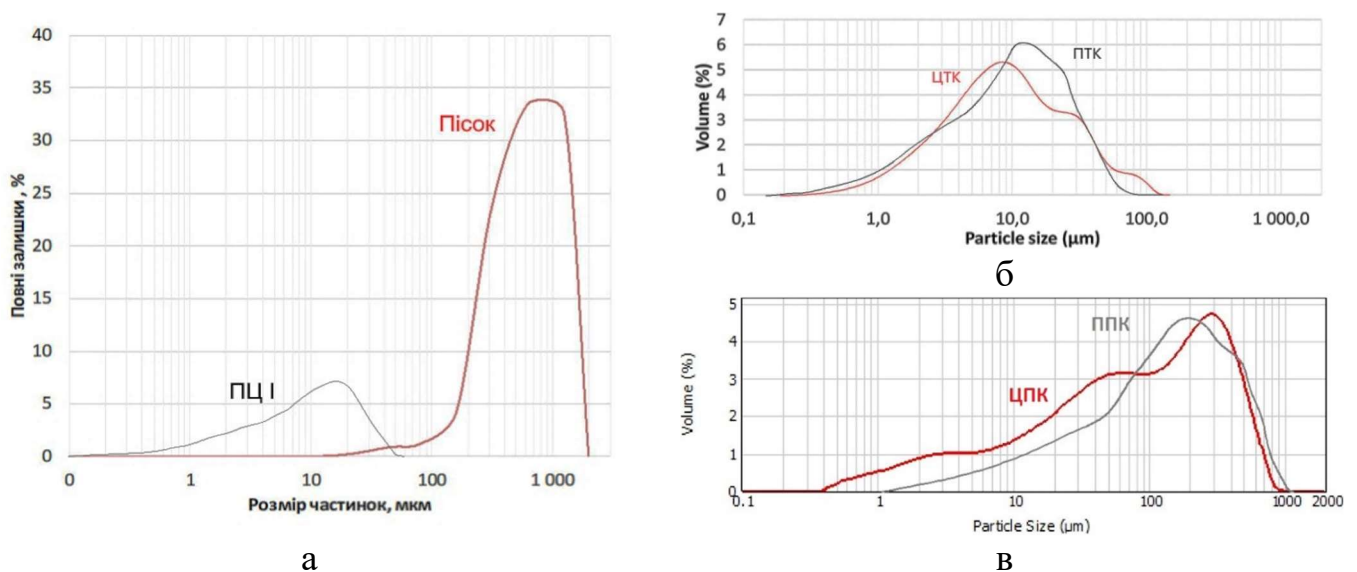


Рисунок 1 - Диференційні криві розподілу частинок за розмірами:  
 а – портландцемент ПЦ I-500 та пісок; б –цеолітовий (ЦТК) та перлітовий (ПТК) тонкодисперсні компоненти; в – цеолітовий (ЦПК) та перлітовий (ППК) полідисперсні компоненти

полідисперсного цеолітового компоненту ЦПК знаходиться в інтервалі 100-400 мкм, а полідисперсного перлітового компоненту ППК - в інтервалі 100-300 мкм. Водночас, діапазон цементних фракцій 0,1-60 мкм охоплюється ними лише частково.

Оскільки для якісних заповнювачів, що використовуються у високоміцних бетонах, властива практично повна відсутність зерен менше 0,16 мм, а сучасні портландцементи високої активності характеризуються значною тониною помолу, в гранулометрії високоміцних бетонів між в'язучим і дрібним заповнювачем виникають розриви в діапазоні 60-160 мкм (рис.1, а).

Результати лазерної гранулометрії (рис. 1) свідчать, що основний об'єм частинок тонкодисперсних добавок знаходиться в діапазоні 1-60 мкм, що відповідає межах гранулометрії портландцементу. Водночас, диференційне розподілення частинок полідисперсних компонентів показує, що їх зерна розміщені в діапазоні 0,4-800 та 6-1250 мкм для ЦПК та ППК відповідно. Таким чином, шляхом введення полідисперсної добавки цеоліту забезпечується краща неперервність гранулометричного складу на рівні мезоструктурних компонентів, що підтверджує порівняння кривих розподілу складових досліджуваних бетонів та кривої максимальної щільності упакування частинок (рис. 2).

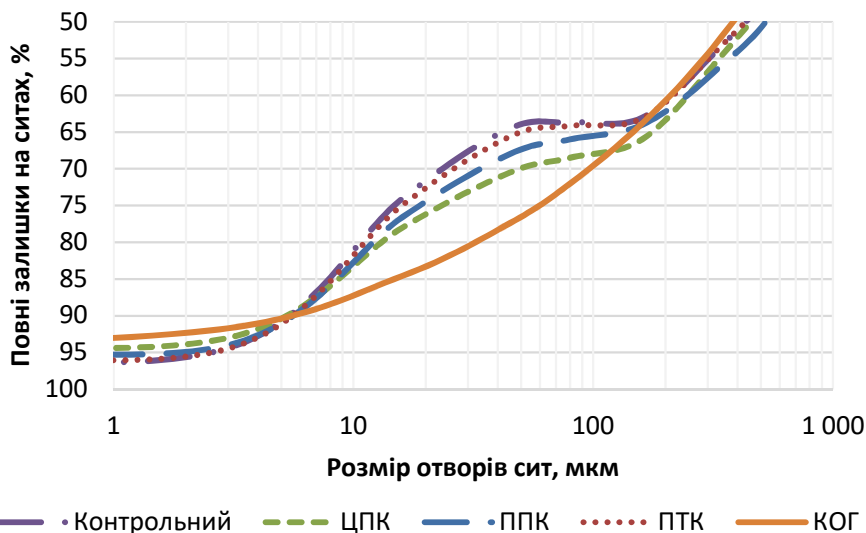


Рисунок 2 – Гранулометричний склад мезоструктурних компонентів,

КОГ – крива оптимальної гранулометрії,  $A(D) = \left(\frac{D}{D_{\max}}\right)^{0.37}$

Водночас, полідисперсні компоненти ЦПК і ППК забезпечують не лише оптимізацію розподілу зерен за розмірами на мезоструктурному рівні, але й активно формують мікроструктуру, проявляючи свою пуцоланічну активність.

Дослідження активності цеолітового та перлітового компонентів різної дисперсності проводили згідно класичної методики за поглинанням СаО з насичених розчинів протягом 28 діб, а також в модельних в'язучих системах. Встановлено, що із збільшенням дисперсності відбувається закономірне зростання кількості зв'язаного вапна як для цеоліту, так і для перліту (табл.1).

Визначення в'язучих властивостей модельних систем «СаО – мінеральний

компонент» на зразках складу 1:0 підтвердило їх високу активність, проте перлітмісткі склади поступаються за міцністю цеолітмістким. В той же час, зразки, до складу яких входили полідисперсні мінеральні компоненти ЦПК і ППК, що характеризуються меншою активністю за поглинанням СаО, показали більші значення міцності як на стиск, так і, особливо, на розтяг при згині. Таким чином, кореляції між рівнем активності пористих мінеральних компонентів різної дисперсності за поглинанням СаО та міцністю не спостерігається.

Таблиця 1 – Властивості модельних в'язучих систем «СаО - пористий мінеральний компонент»

Мінеральний компонент	Активність за поглинанням СаО, мг/г	В/Т	Границя міцності у віці 28 діб, МПа	
			Rзг	Rст
ЦТК	307	0,45	1,4	10,2
ЦПК	270	0,41	2,5	14,8
ПТК	192	0,53	0,6	6,7
ППК	165	0,48	0,9	7,9

Коефіцієнти пуцоланічної активності добавок, визначені згідно стандарту EN-450-1:2009, де активність оцінюється за міцністю цементних розчинів складу 1:3, вказують, що цеолітмісткі в'язучі загалом володіють вищими міцнісними показниками, особливо на розтяг при згині. Так, склади з добавкою 10 мас.% ЦТК і ЦПК характеризуються коефіцієнтом активності при згині ( $K_{па}^{28}$ ) 1,07 та 1,10 відповідно.

Дослідження впливу цеоліту і перліту різної дисперсності на властивості дрібнозернистого бетону складу 1:2 показали характерне для пористих мінеральних добавок збільшення водоцементного відношення для забезпечення однакової рухливості суміші. Незважаючи на зростання водопотреби ( $\Delta В/Ц=4-9\%$ ), дрібнозернисті бетони з добавками цеоліту характеризуються вищою міцністю ( $\Delta f_{ctb}=5-9\%$ ) порівняно з бетоном контрольного складу, що зумовлено його здатністю іммобілізувати певну кількість води, зменшуючи дійсне водоцементне відношення сумішей. Менша міцність бетону із спученим перлітом зумовлена незадовільними механічними характеристиками цього компоненту.

Висока міцність на розтяг при згині, характерна для бетонів з вмістом ЦТК і ЦПК, пояснюються унікальними властивостями будови цеоліту, який має наскрізно-каналну внутрішньокристалічну порову структуру, що забезпечує високий рівень масопереносу на початкових стадіях гідратації та інтенсивне зародкоутворення в об'ємі тверднучої системи. В результаті формується однорідна щільна мікроструктура цементної матриці (рис. 3, а), насичена армуючими голчато-волоконистими низькоосновними гідросилікатами CSH(I) (рис. 3, б), які кольматують поровий простір та армують зони контактної взаємодії (рис. 3, в), зменшуючи їх дефектність, підвищують опір руйнуванню та збільшують міцність на розтяг при згині.

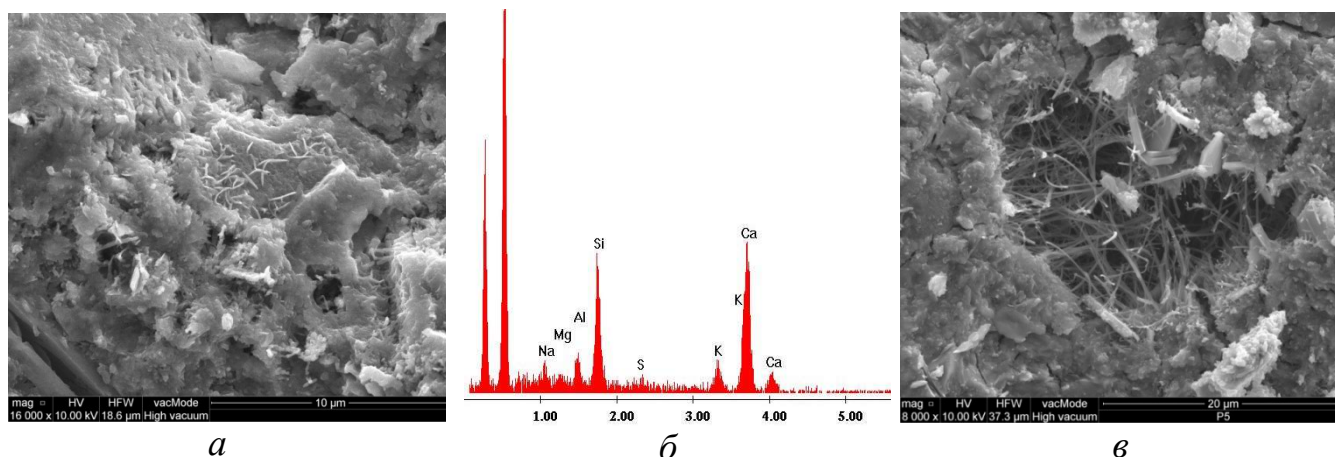


Рисунок 3 – Мікроструктура (а), спектр рентгенівського випромінювання (б) та характер заростання пор (в) цементного каменю з добавкою цеолітового компоненту, гідратованого 28 діб в нормальних умовах

Беручи до уваги кращий розподіл частинок ЦПК з позицій досягнення неперервності гранулометричного складу на мезоструктурному рівні порівняно з ППК, його вищу пуцоланічну активність як за здатністю поглинати CaO, так і за міцністю, особливо на розтяг при згині, більшим потенціалом для практичного застосування володіє цеолітовий полідисперсний компонент.

У **четвертому розділі** викладено результати досліджень фізико-механічних та експлуатаційних властивостей розроблених модифікованих високоміцних цементних бетонів транспортного призначення з впорядкованим поровим простором.

У транспортному будівництві використовують широкий діапазон бетонних сумішей: з маркою за легковкладальністю від S3 (влаштування покриттів засобами малої механізації, елементів штучних споруд) до S1 (влаштування покриттів бетоновкладальником з ковзними рельс-формами), а також жорстких бетонних сумішей (укочувані бетонні покриття, вироби бетонні тротуарні неармовані).

З метою забезпечення оптимального співвідношення між полідисперсним цеолітовим компонентом та суперпластифікатором Sika ViscoCrete 5320 для отримання бетону на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S3 з підвищеними експлуатаційними властивостями, проведено оптимізацію складу бетону в заданому інтервалі зміни кількісного співвідношення ЦПК (0 – 20 мас.%) та добавки пластифікатора (0,7 - 1,3 мас.%) методом ортогонального центрально-композиційного планування (ОЦКП) за критеріями міцності на стиск та розтяг при згині. Встановлено, що використання даних добавок у кількості 10 мас.% та 1,0 мас.% відповідно дає змогу отримати через 28 діб тверднення бетон з найвищою міцністю на розтяг при згині  $f_{ctb}=7,6$  МПа.

Для вивчення впливу ЦПК та повітровтягувальної добавки Sikanol A на властивості бетону, досліджувались бетонні суміші номінального складу 1:1,7:3,5 з вмістом 1 мас.% суперпластифікатора Sika ViscoCrete 5320 (табл. 2).

Раніше встановлена тенденція до зростання водоцементного відношення із введенням в систему ЦПК характерна також і для пластифікованого важкого бетону. Так, його міцність на розтяг при згині у віці 28 діб становить 6,9 МПа, що на 10%

перевищує міцність контрольного складу з меншим В/Ц. Приріст міцності з введенням ЦПК дає змогу знівелювати негативний вплив повітровтягувальної добавки на міцність на розтяг при згині бетону ЦПКПв (табл. 2).

Таблиця 2 – Вплив цеолітового полідисперсного компонента на міцність бетону\*

Умовне позначення	ЦПК, мас. %	Повітровтягувальна добавка, мас. %	Об'єм втягнутого повітря, об. %	В/Ц	Міцність на розтяг при згині, $f_{ctb}$ , у віці 28 діб, МПа	Міцність при стиску, $f_{cm}$ , МПа, у віці, діб		
						3	7	28
К	-	-	2,0	0,48	6,2	36,5	44,8	54,3
Пв	-	0,01	4,2	0,48	5,5	31,4	36,5	45,5
ЦПК	10	-	1,7	0,52	6,9	24,2	36,8	49,2
ЦПКПв	10	0,01	3,9	0,51	6,3	22,1	35,9	44,3

\*Всі склади містять 1,0 мас. % суперпластифікатора

Аналіз результатів визначення силових і енергетичних характеристик тріщиностійкості на підставі повних діаграм стану бетонів підтверджує ефективність використання полідисперсного цеоліту в комплексі з повітровтягувальною добавкою. Показники питомих витрат енергії на статичне руйнування до моменту початку руху тріщини ( $G_i$ ), і загальні питомі ефективні витрати енергії на статичне руйнування ( $G_f$ ) збільшуються на 29 та 14% відповідно для бетону ЦПКПв порівняно з контрольним складом.

Стійкість до руйнування від впливу знакозмінних температур у стані насичення соляним розчином хлоридів є однією з визначальних властивостей бетонів транспортного призначення. За спадом міцності після 150 циклів замерзання відтавання, досліджені бетони на основі сумішей з маркою за легкокладальністю S3 утворюють ряд К – ЦПК – Пв – ЦПКПв. Так, для контрольного складу зниження міцності становить 39,7 та 17,9% для складу, що містить ЦПК та повітровтягувальний компонент. Ці результати кореспондують з значеннями глибини penetрації води, що характеризують водонепроникність. Для бетонів ЦПК та ЦПКПв порівняно з К і Пв властиве незначне підвищення водопоглинання, викликане особливостями порової будови цеоліту.

Зниження загальної пористості бетону з ЦПК на 37% порівняно з контрольним складом свідчить про активну структуроутворюючу роль полідисперсного цеоліту (рис. 4). Його використання у бетонах дає змогу суттєво знизити їх капілярну пористість, що відображається у зміні середнього діаметру пор з 100 нм для бетону контрольного складу К до 67 нм для бетону з вмістом 10 мас. % ЦПК. Варто відзначити, що введення повітровтягувальної добавки закономірно підвищує загальний об'єм пор в бетоні.

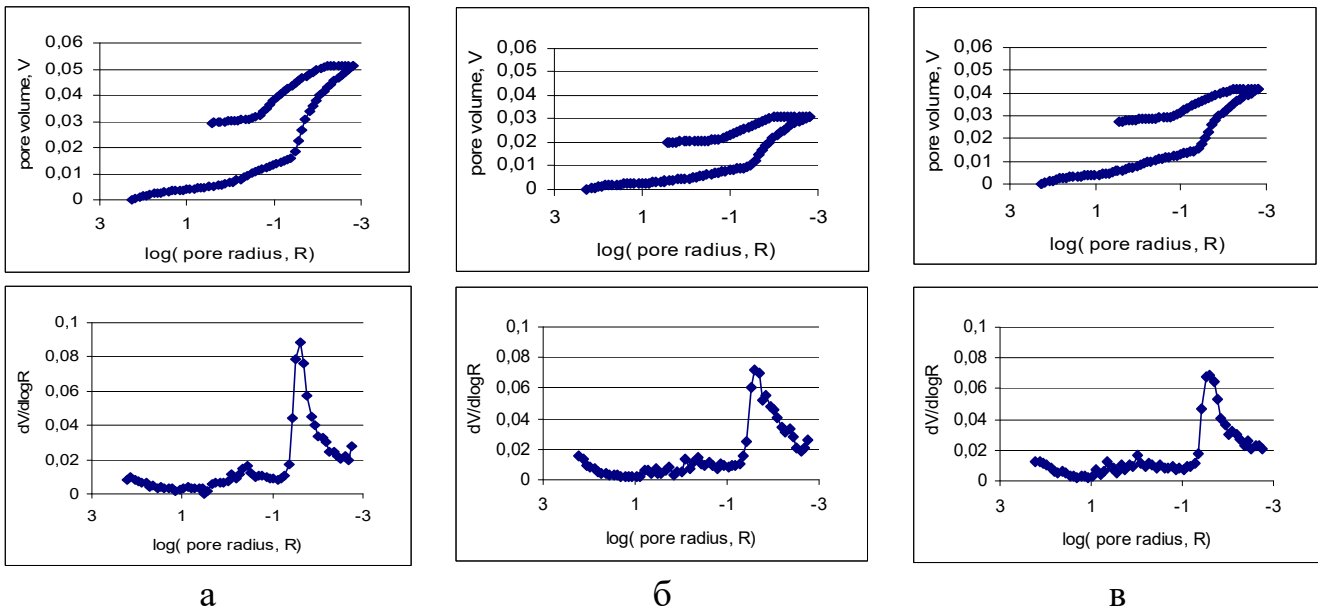


Рисунок 4 – Крива об'ємної інтрузії (зверху) та розподіл пор за розміром (внизу) у бетоні К (а), ЦПК (б), та ЦПКПв (в).

Встановлено, що граничні деформації усадки у віці 180 днів для бетонів ЦПК і ЦПКПв у 2,6 та 5,4 разів нижчі, ніж для бетонів К і Пв відповідно. Слід зазначити, що для бетонів з вмістом полідисперсного цеоліту не має чіткої кореляції між вологовтратами та усадкою, оскільки з втратою 4,5% маси через 7 діб тверднення, деформації усадки у 6 разів менші, порівняно з бетонами без ЦПК. Це свідчить про здатність цеолітового компоненту шляхом адсорбції на стадії замішування створювати внутрішній резерв води у тілі бетону, який з часом компенсує втрату вологи з капілярів при самообезводненні і забезпечує продовження процесів гідратації.

Оскільки вплив, роль і значення внутрішнього догляду зростає із зниженням водоцементного відношення, його ефективність досліджували у бетонах з дійсним  $V/C=0,35$  на основі сумішей номінального складу 1:1,65:2,88 з маркою за легковкладальністю S1 та вмістом 10 мас.% ЦПК і 10 об.% ППК, шляхом порівняння їх властивостей у різних умовах тверднення з контрольним складом К. При твердненні в повітряно-сухих умовах, для бетонів з низьким  $V/C$  та вмістом полідисперсних компонентів, на відміну від контрольного складу К, у віці 90 діб не спостерігається спад міцності на стиск порівняно з бетонами, що тверднули в нормальних умовах. Це підтверджує позитивний вплив додаткового внутрішнього резерву води в структурі пористих компонентів на забезпечення нормального перебігу реакцій гідратації і, як наслідок, розвиток міцності бетону.

Співвідношення значень границі міцності на розтяг при згині у різних умовах тверднення свідчать про високу чутливість цього параметру до обезводнення (рис. 5, а). Так, через 90 діб тверднення в повітряно-сухих умовах міцність на розтяг при згині зразків контрольного складу становить 5,5 МПа, що на 28% нижче міцності бетону, що тверднув у вологих умовах. Найвищими показниками характеризується бетон з ЦПК, для якого досягається клас міцності на розтяг при згині  $B_{тб} 5,6$  у нормальних умовах тверднення. Втрати маси бетонних зразків пропорційні



внутрішній відносній вологості бетонів. Аналіз кривих зміни внутрішньої відносної вологості (рис. 5, б) свідчить, що використання ППК для реалізації механізму внутрішнього догляду є ефективнішим порівняно з ЦПК, що пояснюється, як було попередньо встановлено, високими показниками адсорбції води спученим перлітом внаслідок його відкритої пористості. Проте його низька пуцоланічна активність та незадовільні механічні характеристики обмежують використання ППК у високоміцних бетонах.

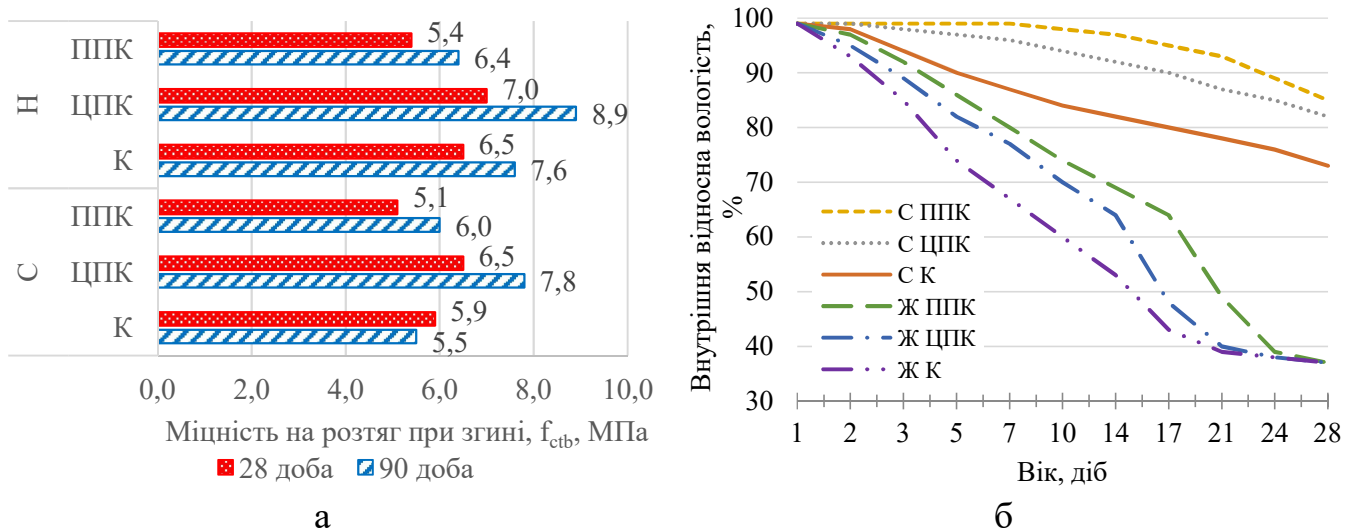


Рисунок 5 – Міцність на розтяг при згині (а), та внутрішня відносна вологість бетонів (б) у різних умовах тверднення: «Н» –  $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=95\pm 3\%$ ; «С» –  $T=20\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=68\pm 3\%$ ; «Ж» –  $T=40\pm 3^{\circ}\text{C}$ ,  $\varphi=40\pm 3\%$ ;

Таким чином, використання пористого цеолітового компоненту ЦПК, що реалізує функцію внутрішнього догляду, дає змогу забезпечити повноту протікання реакцій гідратації, уникнути самообезводнення бетону та підвищити його фізико-механічні характеристики.

Забезпечення необхідного рівня морозостійкості дорожнього бетону передбачає введення до його складу повітровтягувальних добавок. Вплив замкнутої мікропористості на властивості високоміцних бетонів на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S1 досліджували шляхом випробування пластифікованих бетонів з  $V/C=0,35$  та вмістом 10 мас.% ЦПК та повітровтягувальної добавки (0,01; 0,015 та 0,025 мас.% для Пв1, Пв2 та Пв3 відповідно). Кінетика наростання міцності на стиск до 28 доби проходить в кореляції з об'ємом втягнутого повітря для усіх складів, але через 3 роки найвища міцність притаманна бетону ЦПКПв1 (рис. 6, а).

Встановлено, що регулювання об'єму втягнутого повітря в бетонах у межах 4-7 об.% для бетонів з вмістом ЦПК не чинить значного впливу на міцність на розтяг при згині. Так, через 28 діб тверднення вона змінюється у діапазоні 9,1-9,4 МПа відповідно, а у віці 3 років максимальною міцністю на розтяг при згині 14,1 МПа характеризується бетон ЦПКПв2 з вмістом 6,5% втягнутого повітря.

За значеннями питомих енерговитрат ( $G_i=247,44$  Дж/м<sup>2</sup>;  $G_F=657,37$  Дж/м<sup>2</sup>) та в'язкістю руйнування ( $K_i=0,99$  МПа·м<sup>1/2</sup>) переважають показники для ЦПКПв2. Це пов'язано із оптимальним вмістом та рівномірним розподілом дрібнодисперсних

бульбашок втягнутого повітря, які виступають демпферами напружень, що сприяє гальмуванню процесів мікротріщиноутворення на докритичній та сповільнює рух магістральної тріщини в закритичній стадіях (рис. 6, б), що підтверджується результатами аналізу порової структури бетону ЦПКПв2 за допомогою комп'ютерної мікротомографії. Реконструкція 3D моделі з роздільною здатністю 5 мкм/voxel показує, що вміст пор з ефективним діаметром 50-200 мкм становить 4,19% загального об'єму в досліджуваному діапазоні.

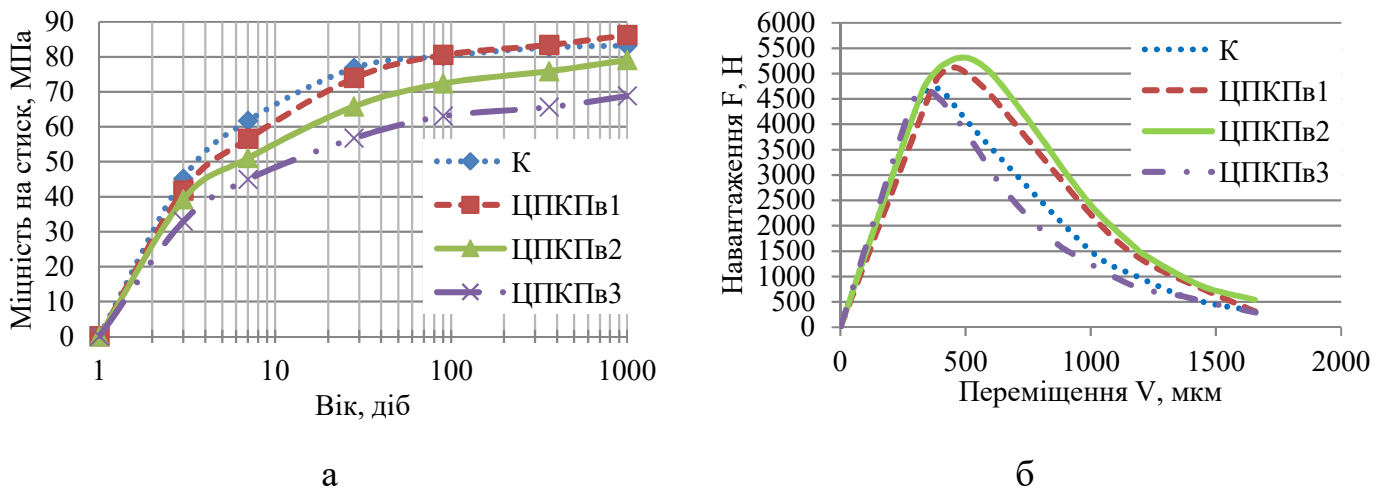


Рисунок 6 – Міцність на стиск (а) та діаграми стану (б) високоміцних бетонів: К – контрольний, ЦПКПв1 – з ЦПК та 4,3% втягнутого повітря, ЦПКПв2 – з ЦПК та 6,5% втягнутого повітря, ЦПКПв3 – з ЦПК та 7,2% втягнутого повітря

Стійкість до дії циклів поперемінного заморожування-відтавання бетонів закономірно зростає ( $\Delta f_c=5,3\%$ ) з підвищенням об'єму втягнутого повітря до 6,5% в суміші, проте передозування повітровтягувальної добавки (0,25 мас.%) також має негативний ефект ( $\Delta f_c= 8,9\%$ ).

Для бетонів з вмістом ЦПК коефіцієнти корозійної стійкості на згин у сульфатному та магнезіальному середовищах становлять 1,23 та 0,8 відповідно, що вище на 20% порівняно з бетоном без добавок. Глибина карбонізації бетонів через 3 роки становить 9, 6 та 2 мм для бетону без добавок, з ЦПК та з ЦПК і повітровтягувальною добавкою відповідно.

Ефективність застосування ЦПК, суперпластифікатора та повітровтягувальної добавки підтверджена результатами дослідження будівельно-експлуатаційних властивостей розроблених високоміцних цементних бетонів (табл. 3).

**У п'ятому розділі** представлені результати дослідно-промислового впровадження високоміцних бетонів транспортного призначення та виробів бетонних тротуарних неармованих на основі розроблених складів.

Проведено промислову апробацію розроблених бетонів при влаштуванні цементобетонного покриття проїздів на території ТОВ «Дрогобицький бетонний завод». Результати випробувань підтвердили досягнення високої ранньої ( $f_{ctb}^7=4,9$  МПа) та проектної міцності на розтяг при згині ( $f_{ctb}^{28}=6,4$  МПа) при



Таблиця 3 – Будівельно-експлуатаційні властивості високоміцних бетонів

Показник	Одиниці вимірювання	Значення показника для бетону складу	
		контрольного	з ЦПК та 0,15 мас.% Sikanol A
Міцність на стиск, $f_{cm}$ , у віці 28 діб 3 роки	МПа	76,3 83,5	66,4 79,2
Міцність на розтяг при згині, $f_{ctb}$ , у віці 28 діб 3 роки	МПа	9,5 11,3	10,1 14,1
Об'єм втягнутого повітря в бетонній суміші, $V_p$	%	2,8	6,5
Водопоглинання за масою, $W_m$	%	2,1	2,2
Глибина penetрації води, $e$	мм	5,3	3,5
Усадка бетону, $\varepsilon_y$	мм/м	0,12	0,02
Глибина карбонізації	мм	9	2
Корозійна стійкість, $K_{CS}^{3r}$		0,72	0,80
Зниження міцності після 200 циклів заморожування – відтавання, $\Delta f_{cm}$	%	15,2	5,3
Стираність	г/см <sup>2</sup>	0,27	0,29
В'язкість руйнування, $K_i$	МПа·м <sup>1/2</sup>	0,81	0,99
Загальні питомі ефективні енерговитрати на статичне руйнування, $G_F$	Дж/м <sup>2</sup>	535,58	657,37

забезпеченні показників рухливості бетонної суміші (марка за легковкладальністю S3), що дозволило влаштувати покриття за допомогою засобів малої механізації.

Порівняльний розрахунок витрат на влаштування дорожнього покриття для традиційного та розробленого високоміцного бетону свідчить, що використання бетону з класом міцності на згин  $B_{tb}$  8,0 дає змогу знизити товщину конструкції з 25 до 18 см із забезпеченням розрахункових коефіцієнтів надійності. Питомий економічний ефект від зниження вартості матеріалів і виконання робіт складає 92 тис.грн. на 1000м<sup>2</sup> дорожнього покриття.

У виробничих умовах ПП «Застава» виконано промислову апробацію розробленого високоміцного бетону при випуску виробів бетонних тротуарних неармованих типу «Старе місто». Введення 10 мас.% полідисперсного цеолітового компоненту та 1 мас.% суперпластифікатора до складу бетону дозволило досягнути високої ранньої міцності ( $R_c=29,6$  МПа), низького водопоглинання (4,3 мас.%) виробів при одночасній економії в'язучого та скороченні часу витримки в кліматичній камері. Відсутність самообезводнення бетону, виготовленого при низькому водоцементному відношенні за рахунок реалізації умов внутрішнього догляду забезпечило отримання міцності бетону 50,2 МПа (клас бетону за міцністю на стиск B35). Передбачуваний річний економічний ефект від виготовлення виробів

бетонних тротуарних неармованих з використанням ЦПК, з врахуванням економії в'язучого, зниження тривалості витримки виробів у камері та підвищення продуктивності виробництва, складає 656,64 тис.грн.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У результаті виконання дисертаційної роботи вирішено науково-прикладну задачу розроблення високоміцних бетонів транспортного призначення з підвищеними будівельно-експлуатаційними характеристиками. За результатами проведених теоретичних та експериментальних досліджень сформульовано наступне:

1. Встановлена можливість одержання високоміцних бетонів транспортного призначення з покращеною мікро- та мезоструктурою та підвищеною довговічністю. Показано доцільність використання як модифікаторів пуцоланічних полідисперсних мінеральних компонентів в поєднанні з полікарбоксилатним суперпластифікатором та повітровтягувальною добавкою для регулювання водно-повітряного співвідношення, впорядкування порового простору бетону і формування комплексу підвищених експлуатаційних властивостей.

2. Показана позитивна роль крупних фракцій пуцоланових полідисперсних компонентів у покращенні гранулометрії тверднучих систем. Шляхом аналізу розподілу частинок цеолітового та перлітового компонентів за розмірами встановлено, що вміст фракції 60 - 160 мкм в їх складі становить близько 50%. Це компенсує нестачу відповідних фракцій у діапазоні між розміром частинок цементу і піску, а відтак забезпечує неперервність гранулометричного складу та більш щільне упакування зерен на рівні мезоструктури бетону, впорядковуючи тим самим поровий простір.

3. Дослідженнями модельних систем виявлено, що кореляції між рівнем активності пористих мінеральних добавок різної дисперсності за поглинанням СаО та міцністю не спостерігається. Так, цеолітові мінеральні компоненти володіють більшою порівняно з перлітовими активністю за зв'язуванням вапна (270, 307, 165 та 192 мг/г для ЦПК, ЦТК, ППК і ПТК відповідно). Найвищим індексом пуцоланічної активності за міцністю на згин ( $K_{\text{па}}^{90} = 1,14$ ) характеризується склад з ЦПК. Встановлено, що дрібнозернисті бетони з добавкою ЦПК, незважаючи на зростання водопотреби ( $\Delta V/C=9\%$ ) для забезпечення однакової рухливості суміші, характеризуються вищою міцністю ( $\Delta R_{\text{зг}}=9\%$ ) порівняно з бетоном контрольного складу. Таким чином, відбувається зменшення дійсного В/Ц відношення сумішей завдяки здатності пористих компонентів акумулювати воду в процесі перемішування.

4. Фізико-хімічними дослідженнями показано позитивну роль ЦПК у процесах формування мікроструктури. В результаті масоперенесення у внутрішньокристалічній каналній системі цеоліту, утворюється щільна дрібнопориста структура цементної матриці, насичена гелеподібними та субмікроструктурними голчасто-волокнистими низькоосновними гідросилікатами кальцію типу CSH(I), рівномірно розподіленими в об'ємі тверднучої системи. Встановлено, що внаслідок цього відбувається краще заповнення і кольматація порового простору, армування зон контактної взаємодії, зменшується кількість

дефектів та дислокацій, підвищується опір руйнуванню та зростає міцність на розтяг при згині.

5. Методами експериментально-статистичного моделювання оптимізовано вміст ЦПК (10 мас.%) та суперпластифікатора Sika Viscocrete 5320 (1,0 мас.%) в бетоні складу 1:1,7:3,5 на основі сумішей з маркою за легковкладальністю S3 за критеріями міцності. Показано, що комплекс прийнятих технологічних рішень (використання ЦПК в поєднанні з 1 мас.% Sika Viscocrete 5320 та 0,01 мас.% Sikanol A) на стадії проектування бетонів транспортного призначення відіграє позитивну роль в забезпеченні зростання міцності на розтяг при згині на 7-15%, тріщиностійкості ( $\Delta G_F = 67$  Дж/м<sup>2</sup>), морозостійкості (не менше F150), водонепроникності (WPD=3,5мм) та зниження глибини карбонізації (з 9 до 2 мм). Загальна пористість та середній діаметр пор бетонів з добавкою ЦПК знижуються на 37 і 33% відповідно, деформації усадки зменшуються у 2,6 та 5,4 разів для складів без вмісту і з вмістом повітровтягувальної добавки відповідно.

6. Аналізом порової структури бетону з В/Ц=0,35 номінального складу 1:1,65:2,88 з вмістом ЦПК за допомогою комп'ютерної мікротомографії встановлено, що введення повітровтягувальної добавки в кількості 0,15 мас.% забезпечує оптимальний вміст (6,5 об.%) та розподіл за розміром дрібнодисперсних бульбашок втягнутого повітря, які, виступаючи демпферами напружень, разом із модифікуванням мікроструктури бетону, сприяють гальмуванню процесів мікротріщиноутворення на докритичній ( $G_i=247$  Дж/м<sup>2</sup>) та сповільнюють рух магістральної тріщини в закритичній ( $W_L=295$  Дж/м<sup>2</sup>) стадіях. Бетони з оптимальним вмістом втягнутого повітря також характеризуються високими фізико-механічними та експлуатаційними показниками: міцністю на стиск ( $f_{cm}=66,4$  МПа) і розтяг при згині ( $f_{ctb}=10,1$  МПа), а також стійкістю до дії циклів поперемінного заморожування-відтавання ( $\Delta f_{cm} = 5,3\%$ ), водопоглинанням ( $W_m=2,1$  %), корозійною стійкістю ( $KC_{3^{37}}=0,80$ ).

7. Підтверджено можливість використання пористих полідисперсних компонентів для забезпечення внутрішнього догляду за бетонами в сухих умовах тверднення та нівелювання впливу самообезводнення. Встановлено, що внутрішня відносна вологість бетону з В/Ц=0,35 та добавкою ЦПК через 14 діб тверднення при температурі 40<sup>0</sup>С і відносній вологості повітря 38% є на 10 % вищою порівняно з контрольним складом. Введення до складу бетону полідисперсних компонентів дає змогу на 10-30 % підвищити опір згинаючим навантаженням як в нормальних температурно-вологісних, так і в повітряно-сухих умовах тверднення без значних втрат та падіння міцності на стиск.

8. Результати дослідно-промислового впровадження підтверджують ефективність використання розроблених високоміцних бетонів для будівництва цементобетонних покриттів та виготовлення виробів бетонних тротуарних неармованих. Ефективність від впровадження розроблених високоміцних бетонів складає 92 тис.грн. на 1000 м<sup>2</sup> дорожнього покриття. Передбачуваний річний економічний ефект від зниження вартості виготовлення виробів бетонних тротуарних неармованих складає 656,64 тис.грн.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

**Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях України, які включено до міжнародних наукометричних баз:**

1. Markiv, T., Sobol, K., Petrovska, N., & Hunyak, O. The Effect of Porous Pozzolanic Polydisperse Mineral Components on Properties of Concrete. In International Conference Current Issues of Civil and Environmental Engineering Lviv-Košice–Rzeszów. 2020. Springer, Cham. P. 275-282. (Scopus).

2. Hunyak, O., Sobol, K., Markiv, T., & Bidos, V. The effect of natural pozzolans on properties of vibropressed interlocking concrete blocks in different curing conditions. Production Engineering Archives, 2019. 22(22), P. 3-6. DOI:10.30657/pea.2019.22.01 (BazTech).

3. Гуняк О. М. Пуцоланічні добавки для портландцементів транспортного будівництва. Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. — № 877. — С. 88–93. (Index Copernicus).

4. Sobol, K., Markiv, T., Hunyak, O. Effect of mineral additives on structure and properties of concrete for pavements. Selected Scientific Papers-Journal of Civil Engineering. 2017. Vol.12 №2. – P.95-100. (BazTech).

**Статті у наукових фахових виданнях України:**

5. Шевчук Г. Я., Гуняк О. М., Гнип О. П., Мішин В. М. Розробка бетонів для дорожніх покриттів підвищеної довговічності з використанням добавок полікарбонатного типу. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. Вип. 46. С. 371–376.

6. Markiv T., Huniak O., Sobol Kh. Optimization of concrete composition with addition of zeolitic tuff. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва. 2014. № 781. С. 116–120. (Проведено факторний експеримент)

7. Гуняк О. М., Соболев Х. С., Марків Т. Є. Оптимізація складів спеціальних цеолітовмісних портландцементів. Містобудування та територіальне планування. 2014. № 54. С. 139–143.

8. Марків Т. Є., Соболев Х. С., Бліхарський З. Я., Гуняк О. М. Дослідження будівельних розчинів з добавкою цеолітів. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2015. № 823. С. 222–228.

9. Солодкий С. Й., Гуняк О. М., Марків Т. Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. Вип. 98. С. 247–255.

**Наукові праці, що підтверджують апробацію матеріалів дисертації:**

10. Solodkyu, S., Markiv, T., Sobol, K., Hunyak, O. Fracture properties of high-strength concrete obtained by direct modification of structure. In MATEC Web of Conferences. Vol. 116, p. 01016 -2017. EDP Sciences. eISSN: 2261-236X (SCOPUS)

11. Markiv T., Hunyak O., Sobol K., Blikharsky Z. The effect of active mineral additives on properties of HSC in different hardening conditions // *20. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar, 12-14 September 2018.* – 2018. – P. 851–857.
12. Markiv T., Sobol K., Hunyak O., Panek R., Franus M. The effect of zeolitic tuff on the properties of concretes // *The 10th International Conference on the Occurrence, Properties, and Utilization of Natural Zeolites (24th to 29th of June 2018 in Cracow, Poland).* – 2018. – P. 155–156.
13. Солодкий С.Й., Марків Т.Є., Гуняк О.М., Гостинецький Б.А. Вплив органо-мінеральних добавок на властивості високоміцних бетонів // *Матеріали міжнародної науково-практичної конференції.* Харків: ХНУСА. -2015. - С. 29-34.
14. Марків Т.Є., Соболю Х.С., Гуняк О.М. Цеолітовмісні цементи для бетонів транспортного призначення. *Сучасні тенденції розвитку і виробництва силікатних матеріалів.* - 2016, - С.97-99.
15. Hunyak O., Markiv T., Sobol K. Effect of mineral additives on structure and properties of concretes for pavements // XVI. International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów “Current Issues of Civil and Environmental Engineering Košice-Lviv-Rzeszów”. Book of abstracts. Kosice, 2017. – P. 21.

## АНОТАЦІЯ

**Гуняк О. М. Високоміцні бетони транспортного призначення з підвищеною довговічністю. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступення кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироб. – Національний університет “Львівська політехніка”, Міністерство освіти і науки України, Львів, 2019.

Дисертаційна робота присвячена питанням підвищення довговічності високоміцних бетонів транспортного призначення шляхом системного поєднання пуцоланових полідисперсних компонентів, суперпластифікатора та повітровтягувальної добавки для покращення їх мікро- та мезоструктури. Встановлена багатофункціональна роль полідисперсного цеолітового компоненту, що полягає в оптимізації гранулометричного складу бетону на мезоструктурному рівні, формуванні щільної однорідної мікроструктури цементної матриці, а також в створенні внутрішнього резерву води для запобігання самообезводненню бетону. Розроблено та оптимізовано за критеріями міцності складу цементних бетонів для транспортного будівництва з використанням пористих пуцоланічних мінеральних компонентів та доведена їх ефективність у здійсненні функції внутрішнього догляду. Досліджено їх вплив на фізико-механічні властивості, тріщиностійкість та показники довговічності бетонів на основі сумішей різної рухливості. Проведено дослідно-промислове впровадження розроблених високоміцних бетонів транспортного призначення та обгрунтовано їх техніко-економічну ефективність.

**Ключові слова:** високоміцні бетони, полідисперсні пуццоланові компоненти, внутрішній догляд, довговічність бетонів транспортного призначення, будівельно-експлуатаційні властивості.

## АННОТАЦІЯ

**Гуняк О. М. Высокопрочные бетоны транспортного назначения с повышенной долговечностью. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискания ученой степени кандидата технических наук (доктора философии) по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия. – Национальный университет «Львівська політехніка», Министерство образования и науки Украины, Львов, 2019.

Диссертация посвящена вопросам повышения долговечности высокопрочных бетонов транспортного назначения путем системного сочетания пуццолановых полидисперсных компонентов, суперпластификатора и воздухововлекающей добавки для улучшения их микро- и мезоструктуры. Установлена многофункциональная роль полидисперсного цеолитового компонента, которая заключается в оптимизации гранулометрического состава бетона на мезоструктурном уровне, формировании плотной однородной микроструктуры цементной матрицы, а также в создании внутреннего резерва воды для предотвращения самообезвоживания бетона. Разработаны и оптимизированы по критериям прочности составы цементных бетонов для транспортного строительства с использованием пористых пуццоланических минеральных компонентов и доказана их эффективность в осуществлении функции внутреннего ухода. Исследовано их влияние на физико-механические свойства, трещиностойкость и показатели долговечности бетонов на основе смесей различной подвижности. Проведено опытно-промышленное внедрение разработанных высокопрочных бетонов транспортного назначения и обосновано их технико-экономическую эффективность.

**Ключевые слова:** высокопрочные бетоны, полидисперсные пуццолановые компоненты, внутренний уход, долговечность бетонов транспортного назначения, строительно-эксплуатационные свойства.

## ABSTRACT

**Hunyak O. M. High-strength concrete with enhanced durability for highway engineering. – On the rights of the manuscript.**

Thesis for the candidate degree of engineering science (Doctor of Philosophy) in specialty 05.23.05 - Building Materials and Products. - Lviv Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Lviv, 2019.

The thesis is devoted to the development of high-strength concrete with the enhanced durability for highway engineering. The incorporation of both pozzolanic polydisperse components and chemical admixtures of plasticizing and air-entraining action allows to obtain the improved meso- and microstructure of concrete.

The role of particle size distribution, chemical composition and structure of zeolitic component in the realization of its properties as a porous pozzolanic mineral additive has

been shown. It has been established that the polydisperse zeolitic component is characterized by higher activity in comparison with the polydisperse perlitic component as well as the pozzolanic activity coefficient of polydisperse mineral components exceeds fine-dispersed ones. The polydispersity of zeolitic component also provides the optimization of particle size distribution at the mesostructure level of concrete by compensating the absence of grains in the range of 60-160  $\mu\text{m}$ .

The formation of dense, fine-porous and fine-crystalline structure of cement paste has been confirmed. It is provided by the presence of fibrous needle-like calcium hydrosilicates CSH (I), which lead to colmatation of pores and reinforcement of contact zones. It has been proved that high strength of fine-grained concrete containing polydisperse zeolitic component is achieved due to its active role in the formation of both microstructure and mesostructure of the hardening system.

Natural polydisperse porous mineral component with unique properties such as zeolitic tuff can be also used for incorporation of internal curing water with minor or without detrimental effect on the mechanical properties of high-strength concrete. It was found that the internal relative humidity of concrete with addition of polydisperse zeolitic component is 10% higher compared to the control concrete after 14 days of curing in dry conditions. The addition of polydisperse zeolitic component mitigates self-dessication of concrete and prolongs the hydration of cement.

The mix proportions of concrete incorporating porous polydisperse mineral component and chemical admixtures for highway engineering have been designed and optimized. Such complex modification leads to 7-15% higher bending strength, better resistance to freeze-thaw cycles (F150), higher fracture energy ( $\Delta G_F = 67 \text{ J/m}^2$ ) and lower carbonation depth ( $h=2 \text{ mm}$ ) of the optimized concrete composition. The addition of both zeolitic component and air-entraining agent results in 5,4 times lower shrinkage deformation of concrete. The water penetration depth of hardened concrete is 3,5 mm, therefore it can be attributed to waterproof. Total porosity and average pore diameter are reduced by 37 and 33% respectively for concrete with the addition of polydisperse zeolitic component.

The combination of air-entraining agent together with polydisperse zeolitic component and superplasticizer results in optimal content and uniform distribution of fine air bubbles, which act as stress dampers, contributing to slow down both the process of microcrack formation in pre-peak stage ( $G_I=247 \text{ J/m}^2$ ) and crack propagation in the post-peak stage ( $W_L=295 \text{ J/m}^2$ ).

The pilot industrial application of the developed high-strength concrete for highway engineering was carried out constructing concrete pavement and manufacturing concrete interlocking blocks. The economic efficiency of the industrial application of high-strength concrete is UAH 92 000 per 1000  $\text{m}^2$  of pavement. The estimated annual economic impact of reducing the manufacturing cost of concrete interlocking blocks is UAH 656 640.

**Keywords:** high-strength concrete, polydisperse pozzolanic components, internal curing, the durability of concrete for highway engineering, concrete structural properties.





Підписано до друку \_\_.\_\_.2019 р.

Формат \_\_\_×\_\_\_ —/—. Папір . Гарнітура Times New Roman.

Друк \_\_\_\_\_. Ум. друк. арк. \_\_\_\_\_.

Наклад \_\_\_\_\_ прим. Зам. № \_\_\_\_\_.

---

Надруковано \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_