

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Чистяков Артем Олександрович

УДК 691.327


ДИСЕРТАЦІЯ
БЕТОНИ ОСНОВИ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ
З ВИКОРИСТАННЯМ ВТОРИННИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ

Спеціальність 192 – Будівництво та цивільна інженерія

Галузь знань 19 – Архітектура та будівництво

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело


Чистяков А.О.

Науковий керівник:

Кровяков Сергій Олексійович, доктор технічних наук, професор

Одеса – 2024

АНОТАЦІЯ

Чистяков А.О. Бетони основи дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія. Одеська державна академія будівництва та архітектури – Одеса, 2024.

Метою роботи є розробка бетонів основ дорожнього одягу з забезпеченою міцністю та довговічністю при максимальному використанні вторинних заповнювачів.

У вступі обґрунтовано актуальність та наукову новизну теми дисертаційного дослідження, показано зв'язок з сучасними науковими та економічними тенденціями, показано цінність роботи з точки зору сталого розвитку.

У першому розділі проаналізовано світовий та вітчизняний досвід будівництва та використання жорстких цементобетонних дорожніх покриттів. Встановлено, що такі дороги набули широкого розповсюдження в США та країнах Західної Європи. Описано переваги цементобетонних жорстких дорожніх покриттів. В ході вивчення властивостей цементобетонних дорожніх покриттів встановлено, що для роботи у жарких кліматичних регіонах, таких як південь України, такі дороги є оптимальними у зв'язку з відсутністю деформацій під дією підвищених температур. Проаналізувавши наукову літературу та офіційні документи і програми, було зроблено висновок про зростання розповсюдження цементобетонних дорожніх покриттів у країнах Східної Європи, в тому числі в Україні. За даними Укравтодору у період до 2040 р планується збільшення частки жорстких дорожніх покриттів в Україні до 30%. Досвід експлуатації таких покриттів в Україні показав доцільність їх повномасштабного впровадження в якості дорожніх та аеродромних покриттів. Зазначено, що сировинна база в Україні здатна повністю забезпечити

необхідність в матеріалах для виготовлення цементобетону з вітчизняних матеріалів.

В ході дослідження було проаналізовано властивості та особливості складів бетонів для основ дорожнього одягу жорстких дорожніх покриттів, проведено оцінку доцільності використання добавок суперпластифікаторів, фібри та інших модифікаторів відповідно до рекомендацій вітчизняних та закордонних дослідників.

Проведено аналіз світового досвіду використання вторинних бетонних заповнювачів для виготовлення бетону. Встановлено, що бетони на основі вторинних заповнювачів показують несуттєве зниження міцностних властивостей у порівнянні з бетонами на природніх заповнювачах. Представлено успішне використання вторинних заповнювачів різної структури та фракції для виготовлення бетонів для облаштування основ дорожніх покриттів, аеродромів, технічних споруд та конструкцій житлових будівель. Була встановлена доцільність використання бетонів на вторинних заповнювачах саме для виготовлення основ дорожнього одягу цементобетонних доріг.

Проаналізовано властивості складів та особливості технологічних рішень при виготовленні бетонів із вторинних заповнювачів для основ дорожнього одягу. Зазначено вплив різних видів вторинних заповнювачів на рухомість суміші, на середню густину, водопоглинання та міцність отриманих бетонів. Представлено різновиди вторинних заповнювачів, які потенційно можливо використовувати для ефективного виготовлення бетонів. Доведена екологічна привабливість та економічна доцільність використання вторинної сировини в будівництві. Зроблено висновок про високу актуальність досліджень у даному напрямку, що обумовлено високою різноманітністю вторинних заповнювачів, доступністю сировинної бази, зокрема з врахуванням великих обсягів спричинених бойовими діями руйнувань, та неповним обсягом знань та технологічних рішень при виготовленні бетонів на основі вторинних заповнювачів. Встановлено, що масове використання бетону на основі вторинних заповнювачів можливо в конструкціях для яких не висувається

високих вимог щодо міцності та морозостійкості, зокрема у основах дорожнього одягу.

На основі даних отриманих з аналізу світового досвіду з розробки цементобетонних дорожніх покриттів та використання вторинних заповнювачів для виготовлення бетонів сформувано *робочу гіпотезу* дисертаційного дослідження. З врахуванням значної різниці у властивостях вторинних заповнювачів (крупних та дрібних) підбір оптимальних складів бетонів для будівництва основ дорожніх покриттів слід проводити експериментально. Для досягнення необхідної міцності і морозостійкості досліджуваних бетонів необхідно використовувалися ефективні добавки суперпластифікатори, та за необхідним обґрунтуванням фібру. Експериментальні дослідження слід проводити з використанням великого асортименту вторинних та природних заповнювачів крупної та дрібної фракції на декількох видах цементу, зокрема з різним вмістом шлаку доменних печей для підвищення використання переробленої сировини для виготовлення бетону.

Виходячи з робочої гіпотези та беручи до уваги проведений аналіз наукової літератури з даної галузі, була сформульована *мета роботи*: розробка бетонів основ дорожнього одягу з забезпеченою міцністю та довговічністю при максимальному використанні вторинних заповнювачів.

У *другому розділі* дисертації представлено загальну схему та послідовність проведення дослідження. Детально описано методику виготовлення бетонної суміші та експериментальних зразків, представлено методи визначення фізико-механічних властивостей бетонів на основі вторинних заповнювачів для дорожнього будівництва. Наведено основні характеристики матеріалів, які були використані під час дослідження: крупних і дрібних вторинних заповнювачів різних типів, гранітного щебеню, гранітного річкового гравію, кварцового піску різних кар'єрів, цементів, суперпластифікаторів та фібри різних типів.

В *третьому розділі* представлено основні результати дослідження властивостей бетонів на вторинних заповнювачах для основ жорсткого дорожнього одягу. Проведено оцінку позитивного впливу на навколишнє

середовище використання продуктів демонтажу будівель та споруд в рамках їх життєвого циклу. Проаналізовано та доведено раціональність використання основних технологій демонтажу будівель та споруд для ефективного видобутку вторинних заповнювачів з будівельних відходів. Експериментально визначено ефективність використання пластифікаторів різного типу для бетонів на вторинному щебені для основ автомобільних доріг, проведено порівняння властивостей бетонів на основі різних видів цементів та пісків. В ході експерименту підтверджено ефективність застосування вторинних заповнювачах для виготовлення бетонів для влаштування основи жорсткого дорожнього одягу. Порівняно фізико-механічні властивості бетонів з різними типами крупного і дрібного заповнювача (гранітного річкового гравію, вторинного щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки, кварцового піску, вторинного піску з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного піску з переробленої цегляної кладки). Використано різні типи цементу та добавки суперпластифікатору в ході 2-х серій експериментів. У першій використовувався портландцемент СЕМ II/B-S 32.5 R та суперпластифікатор Soudal Soudaplast, у другій – портландцемент СЕМ II/B-S 42.5 R та суперпластифікатор Verament NT28. Порівняно властивості бетонів з різною кількістю цементу на основі вторинних заповнювачів різних типів.

За результатами дослідження встановлено, що всі досліджені бетони на вторинних заповнювачах характеризувалися достатньою високою міцністю, зокрема на розтяг при згині (від 2,82 до 3,84 МПа). Також бетони забезпечували достатню для основ дорожнього одягу морозостійкість (F100) та високу ударостійкість. Бетони на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій та кварцовому піску характеризуються вищою міцністю на стиск та на розтяг при згині, ніж бетони на основі річкового гравію та кварцовому піску. Бетони на основі вторинних заповнювачів крупної та дрібної фракції показали міцність, яка дозволяє використовувати їх у якості бетонів основ дорожнього одягу.

Доведено ефективність застосування бетонів на вторинних заповнювачах для влаштування основи жорсткого дорожнього одягу. Визначено оптимальні склади бетонів на вторинних заповнювачах для виготовлення основ жорстких дорожніх покриттів.

В *четвертому розділі* представлено результат дослідження властивостей бетонів і фібробетонів для основ дорожнього одягу на неоднорідних вторинних заповнювачах. Встановлено, що міцність на стиск і на розтяг при згині бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом є вищою в порівнянні з бетоном на основі річкового гравію, а також майже не відрізняється від міцності бетонів на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій. Визначено вплив поліпропіленової фібри EGIBI PP 32 мкм/12 мм у якості дисперсної арматури для виготовлення бетонів основ дорожнього одягу. Встановлено низьку ефективність дисперсного армування фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм для виготовлення бетонів на основі вторинних заповнювачів, враховуючи вплив на характеристики бетону та економічний фактор.

Доведена можливість використання для основ дорожнього одягу бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементі з високим вмістом шлаку СЕМ Ш/А. Таки бетони мають міцність на стиск від 26,3 до 32,7 МПа, міцність на розтяг при згині від 2,65 до 3,29 МПа і морозостійкість F100, що на 50-100% вище рівня мінімальних вимог щодо міцності і морозостійкості бетонів для монолітної основи згідно ДБН В.2.3-4:2015.

Показано, що дисперсне армування фіброю з лугостійкого скла ANTI-CRAK HP 12 підвищує міцність на стик бетонів основ дорожнього одягу на 4,0-11,8%. При цьому міцність на розтяг при згині бетону на гранітному гравії та кварцовому піску зростає на 9,3%, а бетону на вторинному щебені лише на 3,5%. Використання поліпропіленової фібри VeneSteel 55 викликало зниження міцності бетонів, що обумовлене необхідністю збільшенні В/Ц при використанні даної фібри. Це свідчить про недоцільність застосування в бетонах на вторинному щебені з неоднорідним складом дисперсного армування

використаними в даних дослідженнях типами фібри з врахуванням економічного чинника.

Результати дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми», та у виробництво Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» при влаштуванні бетонних основ дорожнього одягу під'їзду до мосту у с. Шендерівка Корсунь-Шевченківського району Черкаської області на автомобільній дорозі державного значення Т-24-03.

Ключові слова: жорсткий дорожній одяг, основа дорожнього одягу, вторинний заповнювач, пластифікатор, міцність, морозостійкість.

ABSTRACT

Chystiakov A.O. Concretes for bases of road clothing with using of secondary aggregates

PhD thesis. Specialty 192 – Construction and civil engineering – Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. – Odessa, 2024.

The *goal of the work* is the development of concrete foundations for road wear with guaranteed strength and durability with the maximum use of secondary aggregates.

The *introduction* substantiates the relevance and scientific novelty of the topic of the dissertation research, shows the connection with modern scientific and economic trends, shows the value of the work from the point of view of sustainable development.

In the *first section* of the thesis, the global and national experience of construction and using of cement concrete rigid pavements is analyzed. It has been established that such roads have become widespread in the USA and Western European countries. The advantages of cement-concrete rigid road surfaces are described. During the study of the properties of cement-concrete road surfaces, it was established that such roads are optimal for work in hot climatic regions as South of Ukraine due to the absence of deformations under the influence of elevated temperatures. After analyzing of the scientific literature and official regulations, it was concluded that the spread of cement concrete pavements in the countries of Eastern Europe, including Ukraine, is increasing. According to Ukravtodor, in the period until 2040, it is planned to increase the share of rigid pavements in Ukraine to 30 %. The experience of operating such roads in Ukraine has shown the expediency of their full-scale implementation as road and airfield coatings. It is noted that the raw material base in Ukraine is able to fully cover the need for materials for the production of rigid pavements from domestic materials.

During the research, the properties and features of concrete compositions for the bases of road clothing for rigid pavements were analyzed, the feasibility of using

superplasticizer additives, fiber and other modifiers was evaluated in accordance with the recommendations of Ukrainian and foreign researchers.

An analysis of the world international experience of using of secondary concrete aggregates for the production of concrete was carried out. It was established that concretes based on secondary aggregates show an insignificant decrease in strength properties compared to concretes based on natural aggregates. The successful use of secondary aggregates of various structures and fractions for the production of concrete for arranging of the bases of rigid pavements, airfields, technical facilities and structures of residential buildings is presented. It was established the expediency of using concrete on secondary aggregates precisely for the manufacture of the bases of the road clothing of cement-concrete roads.

Properties of compositions and features of technological solutions in the production of concrete from secondary aggregates for the bases of road clothing are presented. The influence of different types of secondary aggregates on the mobility of the mixture, on the density, water absorption and strength of the concretes obtained is indicated. The classification and types of secondary aggregates, which can potentially be used for effective concrete production, are presented. The ecological attractiveness and economical feasibility of using of secondary raw materials in construction has been proven. It was concluded that research in this direction is highly relevant, which is due to the high variety of secondary aggregates, the availability of raw materials, taking into account the large volumes of destruction caused by hostilities and the incomplete amount of knowledge and technological solutions for the production of concrete based on secondary aggregates. It has been established that the mass use of concrete based on secondary aggregates is possible in structures that do not require high strength and frost resistance, in particular in the bases of road clothing.

Based on the data obtained from the analysis of the world experience in the development of cement concrete road surfaces and the use of secondary aggregates for the production of concrete, a *working hypothesis* of the dissertation research was formed. Taking into account the significant difference in the properties of secondary aggregates (coarse and fine), the selection of optimal concrete compositions for the

construction of the bases of rigid pavements should be carried out experimentally. In order to achieve the necessary strength and frost resistance of the studied concretes, it is necessary to use effective additives, superplasticizers, and according to the necessary justification of the fiber. Experimental studies should be conducted using a large assortment of secondary and natural aggregates of coarse and fine fraction on several types of cement, in particular with different content of blast furnace slag to increase the use of recycled raw materials for the production of concrete.

Based on the working hypothesis and taking into account the analysis of the scientific literature in this field, the *goal of the work* was formulated: the development of concrete for bases of road clothing with guaranteed strength and durability with the maximal use of secondary aggregates.

The *second section* of the dissertation thesis presents the general scheme and sequence of the research. The method of manufacturing of concrete mixture and experimental samples is described in detail, the methods of determining of the physical and mechanical properties of concrete based on secondary aggregates for road construction are presented. The main characteristics of the materials that were used during the research are given: coarse and fine secondary aggregates of various types, granite crushed stone, granite river gravel, quartz sand from various quarries, cement, superplasticizers and fibers of various types.

The *third section* presents the main results of the study of the properties of concrete on secondary aggregates for the bases of rigid pavements. An assessment of the positive impact on the environment of using of the products of dismantling buildings and structures within their life cycle was carried out. The rationality of using of the main technologies of dismantling buildings and structures for the efficient extraction of secondary aggregates from construction waste has been analysed and proven. The effectiveness of the use of different types of plasticizers for concrete on secondary aggregates for bases of rigid pavements was determined experimentally. The properties of concrete based on different types of cement and sand were compared. During the experiment, the effectiveness of the use of secondary aggregates for the production of concrete for the arrangement of the bases of road clothing was confirmed.

The physical and mechanical properties of concrete with different types of coarse and fine aggregate (granite river gravel, secondary crushed stone from recycled reinforced concrete structures, secondary crushed stone from recycled brickwork and ceramic tiles, quartz sand, secondary sand from recycled reinforced concrete structures, secondary sand from recycled brickwork) were compared). Different types of cement and superplasticizer additives were used in the course of two series of experiments. In the first, Portland cement CEM II/B-S 32.5 R and superplasticizer Soudal Soudaplast were used, in the second – Portland cement CEM II/B-S 42.5 R and superplasticizer Berament HT28. The properties of concretes based on secondary aggregates with different cement concentrations are compared.

According to the results of the research, it was established that all the studied concretes on secondary aggregates were characterized by sufficiently high strength, in particular for flexural strength in bending (from 2.82 to 3.84 MPa). Also, the concretes provided sufficient frost resistance (F100) and high impact resistance for the bases of road clothing. The composition of concrete based on secondary crushed stone from masonry and ceramic tiles and quartz sand also showed a sufficiently high strength result. Based on the results of the tests, it was established that concretes based on secondary aggregates of coarse and fine fractions showed sufficiently high strength, which allows them to be used as concretes for the bases of road clothing. All the main studied compositions of concrete showed the frost resistance grade F100.

The effectiveness of the use of concrete on secondary aggregates for the arrangement of the bases of road clothing has been proven. The optimal compositions of concrete on secondary aggregates for the manufacture of bases of rigid pavements have been determined.

The *fourth section* presents the results of the study of the properties of concrete and fiber concrete for the bases of road clothing on secondary aggregates with a heterogeneous composition. It was established that the compressive and flexural strength in bending of concretes based on secondary crushed stone with a heterogeneous composition is higher compared to concrete based on river gravel, and also almost does not differ from the strength of concretes based on secondary crushed

stone from reinforced concrete structures. The influence of polypropylene fiber EGIBI PP 32 μm /12 mm as a dispersed reinforcement for the production of concrete bases for road clothing was determined. The low efficiency of dispersed reinforcement with EGIBI PP fiber 32 μm /12 mm for the production of concretes based on secondary aggregates was established, taking into account the effect on the characteristics of concrete and the economic factor.

The possibility of using concrete on secondary crushed stone with a heterogeneous composition and cement CEM III/A with a high slag content for the bases of road clothing has been proven. Such concretes have compressive strength from 26.3 to 32.7 MPa, flexural strength in bending from 2.65 to 3.29 MPa and frost resistance F100, which is 50-100 % higher than the minimum requirements for the strength and frost resistance of concrete for monolithic base according to DBN B.2.3-4:2015.

It is shown that dispersed reinforcement with alkali-resistant glass fiber ANTI-CRAK HP 12 increases the flexural strength of concrete bases of road clothing by 4.0-11.8 %. At the same time, the tensile strength in bending of concrete on granite gravel and quartz sand increases by 9.3 %, and concrete on secondary crushed stone by only 3.5 %. The use of polypropylene fiber BeneSteel 55 caused a decrease in the strength of concrete, which is due to the need to increase W/C when using this fiber. This indicates the impracticality of using the dispersed reinforcement with types of fibers used in these studies in concrete on secondary crushed stone with a heterogeneous composition, taking into account the economic factor.

The results of the dissertation research were implemented in the educational process at the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture in the preparation of masters in the specialty 192 Construction and civil engineering under the studying program "Highways and airfields", and in production by the subsidiary "Cherkasky Oblavtodor" of JSC "Automotive roads of Ukraine" during the construction of concrete bases of the road surface of the approach to the bridge in the village of Shenderivka of the Korsun-Shevchenkiv district of the Cherkasy region on the state highway T-24-03.

Key words: rigid road clothing, bases for road clothing, secondary aggregates, plasticizer, strength, frost resistance.

Список публікацій здобувача за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O. Properties of concrete and fiber-reinforced concrete for bases of road clothes based on secondary aggregates with heterogeneous composition. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2024. №6. С. 99–108. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-99-108>
2. Кровяков С.О., Чистяков А.О. Використання вторинних заповнювачів для бетонів основи дорожнього одягу. *Наука та будівництво*. 2023. №4(38). С. 34–40. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-5>
3. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O. Strength of concrete for bases of road clothes on different types of secondary gravel and sand. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2023. №5. С. 79–85. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-5-79-89>
4. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O., Bershadskyi A. O., Shevchenko T. I. Concretes on secondary crushed stone as a promising material for the rigid pavement base. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2022. №87. С. 85–91 <http://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-85-91>

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

5. Chystiakov A., Bodiak K. Methodology for concrete research based on secondary aggregates. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. 2023. №33. P. 70–76.
6. Popov O., Chystiakov A., Petrovsky A. Analytical methods for selection of demolition technology. *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*. 2021. 1141, 012029. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1141/1/012029>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Кровяков С. О., Чистяков А. О., Ігнатенко А. В. Використання вторинних заповнювачів в бетонах основи дорожнього одягу. *Роль науки у відбудові України* : тези доп. III всеукраїнської наук.-практ. конф. (м. Київ, 29 лист. 2023 р.). Київ, 2023. С. 4–6.

8. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Вплив вторинних заповнювачів на міцність бетонів для основи дорожнього одягу. *Гідротехнічне і транспортне будівництво* : збірник тез міжнародної наук.-практ. конф. (м. Одеса, 25–26 травня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 77–79.

9. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Застосування вторинного щебеню і піску в бетоні основи дорожнього одягу. Збірка тез доповідей 79-ї наук.-тех. конф. професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. (м. Одеса, 18–19 травня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 185.

10. Кровяков С. О., Чистяков А. О., Бершадський А. О. Міцність і середня густина бетонів на вторинному щебені для основ автомобільних доріг. *Гідротехнічне і транспортне будівництво* : збірник тез міжнародної наук.-практ. конф. (м. Одеса, 27–28 травня 2022 р.). Одеса, 2022. С. 29–31.

11. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Властивості бетонів основ автомобільних доріг на вторинному щебені. Збірка тез доповідей 78-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. (м. Одеса, 19–20 травня 2022 р.). Одеса, 2022. С. 200.

ЗМІСТ

Вступ	18
Розділ 1 Сучасний стан та перспективи розвитку використання вторинних заповнювачів для дорожніх бетонів	23
1.1 Світовий та вітчизняний досвід будівництва цементобетонних жорстких дорожніх покриттів	23
1.2 Властивості та особливості складів бетонів жорстких дорожніх покриттів та основ дорожнього одягу	34
1.3 Світова практика використання вторинних заповнювачів для виготовлення бетону	40
1.4 Властивості складів та особливості технологічних рішень при виготовленні бетонів із вторинних заповнювачів для дорожнього будівництва	51
Висновки за 1-м розділом	58
Розділ 2 Характеристики сировинних матеріалів та методи досліджень	60
2.1 Схема проведення досліджень	60
2.2 Методика досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів основ дорожнього одягу	61
2.3 Характеристика використаних матеріалів	68
Висновки за 2-м розділом	76
Розділ 3 Дослідження властивостей бетонів на вторинних заповнювачах для основ жорсткого дорожнього одягу	77
3.1 Оцінка позитивного впливу на навколишнє середовище використання продуктів демонтажу в рамках життєвого циклу будівель та споруд	77
3.2 Аналіз технологій ефективного видобутку вторинних заповнювачів з відходів демонтажу будівель	80
3.3 Дослідження ефективності застосування пластифікаторів різного типу в бетонах на вторинному щебені та різних видах піску	88
3.4 Властивості бетонів з різними типами крупного і дрібного заповнювача	95

3.4.1 Умови експерименту і склади досліджених бетонів	95
3.4.2 В/Ц бетонних сумішей	98
3.4.3 Середня густина досліджених бетонів	100
3.4.4 Міцність бетонів на стиск	102
3.4.5 Міцність досліджених бетонів на розтяг при згині	105
3.4.6 Водопоглинання та морозостійкість бетонів	108
3.4.7 Ударостійкість досліджених бетонів	111
3.4.8 Приблизна собівартість досліджених бетонів	113
Висновки за 3-м розділом	114
Розділ 4 Дослідження властивостей бетонів і фібробетонів для основ дорожнього одягу на неоднорідних вторинних заповнювачах	116
4.1 Дослідження впливу однорідності вторинних заповнювачів на характеристики бетонів для основ дорожнього одягу	116
4.2 Дослідження впливу дисперсного армування поліпропіленовою фіброю на властивості бетону на основі вторинних заповнювачів	123
4.3 Дослідження властивостей бетонів і фібробетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементу з високим вмістом шлаку	129
4.4 Впровадження результатів досліджень	138
Висновки за 4-м розділом	139
Загальні висновки	141
Список використаних джерел	143
Додатки	159
Додаток А. Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про апробацію результатів дисертації	160
Додаток Б. Акти впровадження результатів досліджень	163

ВСТУП

Обґрунтування вибору теми дослідження. Задача переробки і використання залишків демонтованих будівель і споруд з кожним роком стає все більш актуальною майже у всіх країнах світу. Для України, яка потерпає від повномасштабної агресії, така задача стоїть вкрай гостро через наявність значної кількості спричинених бойовими діями руйнувань. В результаті таких руйнувань утворюється велика кількість пошкоджених будівельних конструкцій, що потребують демонтажу для подальшої заміни або будівництва на місці зруйнованого об'єкта нової будівлі чи споруди.

За рахунок масового використання вторинних заповнювачів можливо вирішити проблему переробки не тільки «нових» бетонних відходів, а потенційно провезти рекультивацію звалищ будівельного сміття, що важливо з екологічної точки зору.

Серед всієї маси залишків, що виникають при демонтажі будинків і споруд, слід виділити залишки залізобетонних конструкцій та цегляних стін. Саме вони можуть служити найбільш якісною сировиною для виробництва вторинного щебеню і піску.

Переробка демонтованих та зруйнованих конструкцій може забезпечувати продукування значних об'ємів заповнювачів, але основним недоліком таких заповнювачів є їх відносно низька однорідність. З врахуванням цього перспективним можна визнати використання вторинних заповнювачів у бетонах основ дорожніх одягів. Вимоги до міцності та морозостійкості даних бетонів є відносно не жорсткими, проте об'єми бетонування в основах доріг є значними. Використання жорстких основ дорожнього одягу дозволяє досягнути високої довговічності та функціональної якості доріг з цементобетонним покриттям. Також можливим є застосування цементобетонних основ для доріг з асфальтобетонним покриттям.

Тобто задача розробки бетонів для основи дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів є актуальною як з економічної, так і з

екологічної точок зору. При цьому розробляти подібні бетони необхідно з врахуванням можливості максимального використання продуктів переробки у якості як крупного так і дрібного заповнювачів для бетону.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана в Одеській державній академії будівництва та архітектури на кафедрі автомобільних доріг та аеродромів в рамках держбюджетної теми «Розробка та впровадження сучасних технологій при будівництві автомобільних доріг, водопропускних споруд та аеродромів» (№ держреєстрації 0111U001249).

Метою роботи є розробка бетонів основ дорожнього одягу з забезпеченою міцністю та довговічністю при максимальному використанні вторинних заповнювачів.

Для досягнення мети поставлені **завдання**:

1. Провести оцінку впливу на навколишнє середовище використання продуктів демонтажу будівель та споруд в рамках їх життєвого циклу, а також ефективності основних технологій виробництва заповнювачів з відходів демонтажу.

2. Визначити ефективність застосування пластифікаторів різного типу в бетонах основ автомобільних доріг на вторинному щебені.

3. Дослідити властивості бетонів з різними типами крупного і дрібного заповнювача, зокрема вторинного щебеню і піску з різних матеріалів.

4. Визначити можливість використання вторинного щебеню з неоднорідним складом для виготовлення бетонів для основ дорожнього одягу.

5. Дослідити можливість використання для основ дорожнього одягу бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементі з високим вмістом шлаку.

6. Визначити вплив та ефективність застосування в бетонах на вторинному щебені з неоднорідним складом дисперсного армування різними типами фібри.

7. Провести впровадження отриманих результатів у виробництво а також у навчальний процес.

Об'єкт досліджень. Бетони і фібробетони основ дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів.

Предмет досліджень. Закономірності впливу типу заповнювачів, суперпластифікатору, цементу а також фібри на властивості та структуру бетонів основ дорожнього одягу.

Методи досліджень. В ході дослідження проведено аналіз технологій демонтажу будівель і споруд з можливістю отримання якісного вторинного заповнювачу. Проаналізовано життєвий цикл будівель та споруд з урахуванням циклу їх демонтажу, переробки та вторинного використання. Підбір складів бетонів основ дорожнього одягу на основі вторинних заповнювачів проводився відповідно до рекомендацій нормативних документів. Фізико-механічні властивості бетонних сумішей і бетонів визначалися відповідно до діючих нормативів на повіреному обладнанні. Проводився комплексний порівняльний аналіз отриманих даних.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

- встановлено зміни фізико-механічних властивостей та структури бетонів основ дорожніх покриттів при застосуванні пластифікаторів різного типу;
- встановлено закономірності впливу на властивості та структуру бетонів для основ дорожнього одягу крупних і дрібних вторинних заповнювачів різного типу;
- набуло подальшого теоретичного розвитку і експериментально підтверджено можливість використання вторинного щебеню, зокрема з неоднорідним складом, для виробництва бетонів основ дорожнього одягу;
- встановлено недоцільність застосування дисперсного армування поліпропіленовою і скляною фіброю бетонів на основі вторинних заповнювачів з неоднорідним складом.

Практичне значення отриманих результатів. Проведено аналіз технологій демонтажу будівель і споруд з можливістю отримання якісного вторинного заповнювача. Проаналізовано життєвий цикл будівель та споруд з урахуванням циклу її демонтажу, переробки та вторинного використання.

Розроблено склади бетонів для основ дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів: вторинного щебеню і піску з залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню і піску з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки, вторинного щебеню з неоднорідним складом. Розроблено склади бетонів для основ дорожнього одягу з використанням цементу з високим вмістом шлаку і вторинних заповнювачів. Результати досліджень впроваджено у виробництві Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»», а також використовуються в Одеській державній академії будівництва та архітектури в освітньому процесі при підготовці магістрів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія за освітньою програмою «Автомобільні дороги і аеродроми».

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні експериментальних досліджень структури і властивостей бетонів і фібробетонів основ дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів, проведенні аналізу технологій ефективного видобутку вторинних заповнювачів з відходів демонтажу будівель, обробці та узагальненні отриманих результатів та їх впровадженні у виробництво.

Основні результати досліджень, представлені у дисертації, були отримані здобувачем самостійно. Формулювання мети та завдань дисертації, планування експериментальних досліджень на всіх етапах роботи, обговорення та аналіз результатів досліджень були виконані спільно з науковим керівником.

У надрукованих в співавторстві публікаціях особистий внесок здобувача полягає у проведенні лабораторних досліджень властивостей та структури бетонів основ дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів, інтерпретації та узагальненні їх результатів.

Апробація дисертаційної роботи. Основні результати досліджень, виконаних в рамках даної роботи, доповідалися на: 26й міжнародній науковій конференції з цивільної інженерії «Juniorstav 2024» (м. Брно, Чехія, 2024), III всеукраїнській науково-практичній конференції «Роль науки у відбудові України» (м. Київ, 2023), 33-й щорічній аспірантській конференції з прикладної математики, технології будівництва, геодезії та картографії, ландшафтного

дизайну, теорії конструкцій будівель, інженерії водних ресурсів (м. Братислава, Словацька Республіка, 2023), Міжнародних науково-технічних конференціях «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (м. Одеса, 2022, 2023); 79-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2023), 78-й науково-технічній конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури (м. Одеса, 2022), конференції Computational Civil Engineering Conference CCE2021 (м. Яси, Румунія, 2021), 2-й міжнародній конференції «Innovative Trends on Engineering for Sustainability» ICITES 2021 (м. Керала, Індія, 2021).

Публікації. Основні положення дисертації опубліковані у 11 наукових працях, з яких 4 статті у фахових виданнях України, 2 статті у наукових періодичних виданнях інших держав, 5 тез доповідей у збірниках наукових конференцій.

Структура та обсяг дисертації. Дисертацію викладено на 164 сторінках, у тому числі 125 сторінок основної частини, складається із вступу, 4 розділів, висновків, списку використаних джерел (147 найменування) та додатків на 6 сторінках, містить 36 рисунків і 24 таблиці.

РОЗДІЛ 1

СУЧАСНИЙ СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ ДЛЯ ДОРОЖНІХ БЕТОНІВ

1.1 Світовий та вітчизняний досвід будівництва цементобетонних жорстких дорожніх покриттів

Проектування та влаштування структурно та функціонально стабільного дорожнього покриття є важливим для функціонування ефективної транспортної системи [1], яка є невід’ємною складовою економічного розвитку [2, 3]. Традиційним зношенням доріг вважається втому від деформації, утворення тріщин та руйнування покриття, що викликано регулярним впливом навантаження від руху автотранспорту. На сьогоднішній день серед варіантів вибору дорожнього покриття найбільш розповсюдженими в світі є асфальтобетонні та цементобетонні. Для виготовлення асфальтобетону у якості в’язучого матеріалу використовується бітум, що є причиною низької жорсткості покриття доріг, тобто асфальтобетонні покриття є нежорсткими. В умовах значного рівня експлуатації дороги та високого навантаження на вісь автомобіля, цементобетонне покриття є багато в чому кращим, оскільки має значну міцність та жорсткість на згин.

З практичної точки зору, основна функція верхнього шару дорожнього одягу полягає в тому, щоб передавати навантаження від колеса на інші нижчі шари дорожнього полотна. Бетон є композиційним матеріалом і є основною складовою жорсткого дорожнього покриття, яке зазвичай утворюється з однорідної суміші заповнювачів, води та в’язучих [4]. У всьому світі бетон є одним із найпоширеніших будівельних матеріалів, в тому числі і для дорожнього будівництва [5-7]. Перше цементобетонне дорожнє покриття було побудовано Джорджем Бартоломью у 1891 році в Бельфонтейні (штат Огайо, США). З того часу технологія укладання бетону та його рецептура зазнали деяких змін. Вдалося досягнути високої автоматизації будівельного виробництва, а для

вирішення нагальних екологічних та економічних задач в якості заповнювачів почали використовувати вторинні заповнювачі, а в якості в'язучого додавати до складу більш екологічні матеріали, зокрема геополімери на основі метакаоліну [8].

Найбільшого розповсюдження дороги з жорсткими цементобетонними покриттям здобули в США, де частка таких покриттів становить майже 60% від загального обсягу [9]. Розробка та реалізація нових технологій та рецептур бетону для дорожнього будівництва відбувалась протягом ХХ століття. Було реалізовано багато нових концепцій та інновацій у технології будівництва, підвищувалась продуктивність, що в свою чергу вплинули на конкурентоспроможність та якість цементобетонних дорожніх покриттів. В цей час в США було впроваджено будівництво цементобетонних доріг. Поява бетоноукладальників зі ковзною технологією революціонізувала та механізувала будівництво жорстких дорожніх покриттів, це призвело до підвищення продуктивності, кращої загальної якості та підвищило зчеплення поверхні дороги. У США очікується подальше зростання цементобетонного дорожнього будівництва в результаті дії Північноамериканської угоди про вільну торгівлю, що призводить до збільшення товарообігу на континенті [9].

В країнах Західної Європи цементобетонні дорожні покриття набули розповсюдження особливо для облаштування обочин та найбільш відповідальних частинах доріг. Це обумовлено стійкістю таких покриттів до деформацій поверхні, викликані зупинками автотранспорту, а також більшою довговічністю поверхні. Зчеплення поверхні цементобетонного покриття з шиною є нижчим у порівнянні з поверхнею асфальтобетону, що викликає необхідність рифлювання поверхні при укладанні бетону. Це дещо сповільнює розповсюдження таких доріг. В країнах Південної Європи (Іспанія, Італія, Греція, Кіпр) через екстремальні кліматичні умови наявні підвищені вимоги до дорожнього покриття. В наслідок цього існує необхідність використовувати жорсткі дорожні покриття замість асфальтобетонних у зв'язку з їх надмірною

деформативністю під впливом високих температур навколишнього середовища [10].

На сьогоднішній день (станом на серпень 2023 року) в Грузії ведеться будівництво нової автомагістралі, сполученням Батумі-Кутаїсі-Тбілісі-Верхній Ларс. Враховуючи складний гірський рельєф та сучасні вимоги до безпеки та комфорту дорожнє полотно влаштовується жорстким виключно із цементобетону. В Грузії ведеться реконструкція низки інших другорядних доріг теж з використанням цементобетону у якості дорожнього покриття [11, 12].

Цементобетонні покриття є найбільш ефективними для підвищення несучої здатності, довговічності та міцностних характеристик доріг. Збільшення цих показників є важливою задачею сьогодення у зв'язку зі збільшенням інтенсивності руху, рівня динамічних навантажень і навантажень на вісь великовагового транспорту. У сучасних умовах осьові навантаження часто перевищують 115 кН. Цементобетонні покриття та основи краще розподіляють тиск на ґрунт, ніж асфальтобетонні, оскільки їх модуль пружності вище, ніж у асфальтобетону [13].

Для цементобетону характерне менше нагрівання від сонячних промінів за рахунок світлої поверхні матеріалу. Цей фактор має позитивне значення для експлуатаційних характеристик доріг та автотранспорту, а також для навколишнього середовища у зв'язку зі зменшенням надмірного нагрівання прилеглих до автодоріг територій. Бетонне покриття завдяки світлому кольору поверхні краще відбиває світло, ніж асфальтоване. Ця властивість може дозволити знизити рівень освітлення в темний час доби на автомобільних дорогах, що в свою чергу також позитивно вплине на економічні та екологічні показники внаслідок зменшення використання електроенергії [14].

До найбільш відповідальних частин доріг, з важким експлуатаційним навантаженням варто віднести з'їзди з доріг, місця технічних зупинок, зупинок громадського транспорту, дорожніх розв'язок, перехресть та місць руху трамваїв. Для влаштування покриттів таких конструкцій використовуються високоефективні бетони з дисперсним армуванням, зокрема зі сталевією фіброю

[15-17]. Використання фібри в якості армуючого підсилюючого засобу дозволяє суттєво знизити товщину дорожньої плити, що обумовлено підвищенням міцності на розтяг при згині такого бетону [18, 19]. Для таких бетонів також характерне зниження усадочних деформацій [20]. У роботах [21, 22] показано, що фібра збільшує міцність на стиск на розтяг при згині дорожнього бетону, підвищує морозостійкість.

Цементобетонні жорсткі покриття набули великого розповсюдження у якості аеродромних покриттів по всьому світу. Конструктивна система аеродромного покриття являє собою набір шарів, завданням яких є безпечно сприйняття і передача на ґрунт навантаження від дії літаків під час приземлення, зльоту та переміщення по аеродрому. Безпека руху повітряних суден на аеродромному покритті найбільшою мірою залежить від несучої здатності їх конструкцій. На стан несучої здатності цементобетонних аеродромних покриттів в першу чергу впливають властивості бетону (фізичні, механічні та стійкість до впливу факторів зовнішнього середовища), а також тип і властивості ґрунту під конструкцією покриття. Несуча здатність цементобетонного аеродромного покриття залежить не тільки від створюваних літаком навантажень і характеристик бетону, але й від зовнішніх факторів, у тому числі погодних умов [23]. В регіонах з помірними кліматичними умовами найбільш ефективним покриттям для облаштування аеродромів є цементобетон з дисперсним фібровим армуванням [24].

Значні витрати на будівництво доріг зумовлюють необхідність використання більш дешевих альтернативних матеріалів. Одночасно з цим світові тенденції до захисту та зменшення антропогенного впливу на навколишнє середовище, зменшення викидів вуглекислого газу в атмосферу змушують нас використовувати нові більш екологічні матеріали.

Одним зі шляхів вирішення цієї задачі є використання вторинної сировини, отриманої шляхом переробки відходів демонтованих та зруйнованих будівель та споруд, будівельного виробництва. Після подрібнення та просіювання по фракціям бетонного лому, цегляної кладки, керамічної плитки та інших

будівельних матеріалів утворюються вторинні бетонні заповнювачі різної крупності, якими можливо замінити природний гранітний щебінь та гравій, а також кварцовий пісок.

В низці експериментальних досліджень [25] було оцінено міцність і мікроструктуру самоущільнюваного бетону для будівництва дорожніх покриттів з використанням вапнякового портландцементу (Technical Cement) та дегідроксильованої каолінітової глини (геополімеру). Встановлено, що додавання геополімерів на основі метакаоліну знижує текучість суміші, проте міцність на згин становить 4,86 МПа, що дозволяє виготовляти з такого бетону жорсткі дорожні покриття. Використання цементу з високим вмістом шлаку та золи як відходів виробництва знижує міцність бетону, проте при раціональному застосуванні не критично, що дозволяє використовувати його в якості конструктивного матеріалу. Враховуючи вищезазначену інформацію, та у спробі заохотити використання сучасних екологічних та вторинних матеріалів у жорстких дорожніх конструкціях, вибір інноваційних в'язучих матеріалів є раціональним варіантом [26].

Як відмічено вище, природне зчеплення колеса автомобіля з поверхнею цементобетону є нижчим у порівнянні зі зчепленням з поверхнею асфальтобетону. Проте при рифлюванні верхнього шару покриття з цементобетону та підвищенні його шорсткості зчеплення з колесом стає стабільним, на рівні не нижче, ніж з асфальтобетонними поверхнями. Більш того, враховуючи, що зчеплення колеса з поверхнею саме цементобетону не залежить від температури і слабо залежить від ступеня зволоження, допускається рух транспорту на великих швидкостях у вологу погоду. Відповідно до даних досліджень [27], в Німеччині число аварій на цементобетонних дорогах на 32 % менше від кількості аварій на асфальтобетонних.

Проте, наявні і недоліки покриттів цементобетонного типу, основними з яких є руйнування деформаційних швів, руйнування і відшаровування поверхневого шару бетону та утворення тріщин. Ці фактори є відносно незначущими, але частково стримують швидкий розвиток бетонних покриттів.

Найчастіше лущення бетону відбувається в зонах температурних та деформаційних швів, навколо яких існує найбільша концентрація руйнівних сил. В зоні таких поперечних швів зростають динамічні впливи коліс автотранспорту, в наслідок чого краї плит і прилегла до них частина бетонного покриття сприймають додаткові навантаження. У силу цих та інших факторів поперечні шви викликають зниження міцності поверхневого шару бетону. Для асфальтобетонних покриттів така проблема відсутня у зв'язку з їх монолітністю та цілісністю. Тому для цементобетонних покриттів бажаним є влаштування жорстких бетонних основ.

Україна на сьогоднішній день знаходиться на етапі поступового розвитку будівництва доріг з цементобетонними покриттями. За даними Укравтодору [28] станом на серпень 2020 року, частка доріг з жорстким бетонним покриттям становила 1 % від всієї автотранспортної мережі країни. З близько 170 тис. кілометрів доріг лише 2,4 тис. км було побудовано із цементобетону. Раніше такий тип доріг використовується переважно у промислових зонах та у внутрішніх заводських мережах. У зв'язку із затвердженням програми розвитку цементобетонних доріг на період 2021-2025 рр. частка доріг з жорстким бетонним покриттям має досягти позначку у 3 % [22]. У зв'язку з перевагами таких бетонних покриттів до початку півномасштабного вторгнення планувалося збільшити частку жорстких покриттів доріг в Україні до 30% до 2040 року [28].

На сьогоднішній день цементобетонні ділянки доріг вже побудовано на трасі Н-31 в напрямку від Дніпра до Києва (80 км); на трасі Н-14 Кропивницький-Миколаїв (75 км) та на трасі М-06 в обхід Житомира (22 км) [22, 29]. Ділянка траси Київ – Ковель в обхід м. Житомира показана на рис. 1.1 [30].



Рис. 1.1 Автомобільна дорога Київ-Ковель з ділянкою із цементобетонного покриття після 12 років експлуатації [30]

Цементобетонні дорожні покриття, які були побудовані в Україні в останні роки, знаходяться в гарному експлуатаційному стані. За час експлуатації вони добре себе показали і підтвердили здатність витримувати рух великовантажних транспортних засобів без суттєвих пошкоджень.

Особливо критичне навантаження на дорожнє покриття відбувається літом, під час жаркої погоди, яка притаманна більшості території України. Так вдень під час теплої пори року впродовж довготривалого періоду температура повітря складає $+30 \dots +35 \text{ }^\circ\text{C}$. За умов такого клімату, асфальтобетонні покриття нагріваються до температури $+60 \dots +65 \text{ }^\circ\text{C}$ та вищих показників [27]. В той час як відповідно до нормативів проектування нежорсткого дорожнього одягу розрахункова температура асфальтобетонних шарів не повинна перевищувати $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ [31]. При температурі вищій $+40 \text{ }^\circ\text{C}$ асфальтобетон поводить себе як пластичне тіло і його міцність становить менше 1,0 МПа. В наслідок цього поява колії від впливу руху автотранспорту, особливо в південних регіонах України, є неминучою [27]. Враховуючи вищезазначене, використання переважно асфальтобетонних дорожніх покриттів в Україні, в першу чергу на півдні, не можна вважати доцільним. Асфальтобетонні покриття автодоріг, які становлять

абсолютну більшість від загальної кількості облаштованих шляхів сполучення в Україні, функціонують в критичних умовах.

Тобто основними дефектами на магістральних дорогах з асфальтобетонним покриттям є колійність та ямковість. Для зменшення впливу на дороги та їх збереження вводяться обмеження руху в денний період доби для великогабаритного транспорту, що викликає незручності, є вимушеним заходом та не вирішує проблему [30]. Проте жорсткість та інші фізико-механічні властивості цементобетонного полотна практично не залежать від зміни температури, завдяки цьому в жаркий літній час на цементобетонних покриттях не утворюється колія від накопичення пластичних деформацій, а в зимовий час цементобетонне покриття не стає більш крихким, на відміну від асфальтобетону [27]. Відповідно з врахуванням експлуатаційних вимог, міцностних характеристик і діючих нормативів для дорожнього будівництва, жорсткі покриття на сьогоднішній день є найбільш доцільним дорожнім одягом для підвищення несучої здатності та довговічності доріг. Це підтверджується досвідом використання таких дорожніх покриттів в Україні та за кордоном.

Для повноцінного обґрунтування доцільності використання доріг з жорстким цементобетонним покриттям, в Україні проводилась низка досліджень направлених на прогнозування їх довговічності. Традиційно розрахунок одягу дорожнього полотна ведеться методом граничних станів. Розрахунок полягає в забезпеченні запасу міцності конструкції для запобігання настання критичного граничного стану під впливом експлуатаційних процесів та природно-кліматичних факторів. Відповідно до діючої української нормативної документації ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [32] та ГБН В.2.3-37641918-559:2019 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування» [31], цементобетонні дорожні покриття повинні бути розраховані на тріщиностійкість від дії навантаження транспорту, що в першу чергу передбачає розрахунок полотна дороги на розтяг при згині та на напруження, які виникають під впливом навантаження та температури [32]. Самі деформації згину в конструкції

дорожнього полотна утворюються в результаті дії навантаження пневматичних коліс автомобільного транспорту, при зміні температури покриття відбувається ще і деформація на стиск та розтяг. В результаті досліджень [33] було зроблено висновок, що на додачу до вищевказаних показників, варто враховувати і закономірності попередньої зміни напруження в полотні, що обумовлюється властивостями матеріалів на основі неорганічних в'язучих таких, як цемент. В ході досліджень [34] було доведено можливість аналітичного прогнозування довговічності жорсткого цементобетонного покриття автодоріг. Вона враховує інтенсивність руху, що визначається за методикою ГБН В.2.3-37641918-557 [32], та гранично допустиме розрахункове навантаження, яке може витримати цементобетонне дорожнє покриття під дією виникаючих сил.

Проте на сьогоднішній день в нормативних документах як України, так і багатьох інших країн не передбачені рекомендації з проектування та облаштування деяких дорожніх конструкцій з цементобетону. Так відсутні норми щодо проектування жорсткого покриття на залізобетонній плиті проїзної частини автодорожніх мостів саме з цементобетону [14]. Також відсутні чіткі рекомендації чи вимоги з підбору цементної суміші, виду армування (арматурна сітка, фібра тощо), призначення товщини покриття, влаштування водовідводу тощо. Внаслідок цього часто дорожнє покриття на мостах облаштовується із асфальтобетону при одночасному будівництві основної сухопутної частини дороги із цементобетону. Тому розробку методичних рекомендації з проектування і влаштування цементобетонних дорожніх покриттів варто вдосконалювати [14].

Результати досліджень вітчизняного та зарубіжного досвіду експлуатації цементобетонних покриттів і тривалі спостереження за цементобетонним покриттям дозволяють об'єктивно оцінити переваги та недоліки таких типів доріг. Завдяки високій міцності та несучій здатності, в тому числі до важкого та великогабаритного транспорту, сучасні технології цементобетонного дорожнього будівництва дозволяють досягти терміну служби автодоріг в 20-30 років. За умови руху великовантажного транспорту з навантаженням на вісь в 12

тон та вище, цементобетонне покриття є оптимальним, оскільки має високий опір втомі при повторних навантаженнях. На рівні навантаження 0,4 від руйнівного, конструкція дорожнього одягу з цементобетону витримує не менше 10 млн. циклів повторних навантажень. На рівні 0,3 від руйнівного – не менше 100 млн. циклів повторних навантажень. Таким чином, жорсткі дорожні покриття з цементобетону мають запас на втому 2,5 – 3,5, що цілком достатньо для забезпечення міцності покриття на згин під дією руху практично будь-якої інтенсивності, в тому числі при кількості проїздів розрахункових осьових навантажень, порівняно з пропускною спроможністю смуги руху [27].

Покриття та основа дорожнього одягу з цементобетону здатні краще розподіляти тиск на основу розташовану під конструкцією дорожнього полотна в порівнянні з асфальтобетонним покриттям однакової товщини. Це пояснюється величиною модулю пружності цементобетону, який більше модулю пружності асфальтобетону в 10 і більше разів. В наслідок цього полегшується робота земляного полотна під дією великих навантажень.

Дорожнє покриття та основа з цементобетону має властивість до постійного збільшення міцності впродовж часу у зв'язку з процесами гідратації цементу впродовж строку життя конструкції. Так встановлено, що при сприятливих умовах експлуатації міцність бетону в дорожньому покритті у віці до п'яти років може збільшуватися в 1,3 – 1,5 рази в порівнянні з проектною міцністю (28 діб), в віці до 25 років – до 2 разів і може надалі зростати [27].

За умов належної якості будівництва, дотримання рецептурних та технологічних норм і нормативної експлуатації, термін служби цементобетонних дорожніх покриттів може досягати 50 років без необхідності проведення капітальних ремонтів. Це перевищує показники для асфальтобетонних доріг в 5-8 разів, строк експлуатації яких без капітального ремонту на практиці не перевищує 7-10 років.

За даними [35] частка доріг з цементобетонних покриттів в розвинених країнах таких, як Німеччина і Бельгія становить 31 % і 41 % відповідно. Практично встановлено, що середній фактичний строк експлуатації таких

дорожніх одягів складає 26 років. Більше того, випробування, проведені в Німеччині, показали, що після 28 років експлуатації лише 5 % бетонних покриттів потребують капітального ремонту, в той час як для асфальтобетонних покриттів після такого терміну служби знос майже завжди складає 100 %.

Варто зазначити, що бітум – в'язуча речовина для виготовлення асфальтобетону – матеріал достатньо дорогий. В Україні відсутні промислові потужності для його виготовлення, внаслідок цього для виготовлення асфальтобетонних дорожніх покриттів є необхідність імпортувати сировину, що тягне за собою цілу низку економічних недоліків у порівнянні з використанням виключно сировини національного виробництва. Для виготовлення цементобетонів для будівництва автодоріг може бути використана сировина виключно українського виробництва, в тому числі для приготування фібробетонів та бетонів на основі вторинних заповнювачів. Суттєве зниження використання імпортованих будівельних матеріалів здатне позитивно вплинути на зниження вартості конструкцій у зв'язку з відсутністю надбавочної вартості мита та стимулювання вітчизняної промисловості.

Таким чином, впровадження цементобетонних покриттів та основ сприяє покращенню якості та збільшенню строку служби доріг. Якісні дороги забезпечують економічний розвиток регіонів та держави в цілому, її міжнародну торгівлю та туризм, збільшують безпеку переміщення автомобільним транспортом. У зв'язку зі збільшенням інтенсивності руху та вантажоперевезень автомобільним транспортом на дорогах усіх рівнів за останні десятиріччя та прогнозованим збільшенням руху у майбутньому відбулось зростання рівня навантажень на вісь великовантажних автомобілів та динамічних впливів на покриття, що спричинило зниження строків міжремонтної експлуатації доріг.

Враховуючи наведену вище інформацію, можна зробити висновок, що цементобетон є перспективним дорожнім покриттям, його характеристики міцності та довговічності перевершують показники асфальтобетонних покриттів. Використання бетонних основ дорожнього одягу дозволяє додатково підвищити якість і довговічність доріг.

1.2 Властивості та особливості складів бетонів жорстких дорожніх покриттів та основ дорожнього одягу

У зв'язку з високою перспективністю застосування цементобетонних дорожніх покриттів та бетонних основ дорожнього одягу, українськими та зарубіжними дослідниками проводився ряд експериментів з модифікування та покращення властивостей такого бетону. Для досягнення високих показників міцності, довговічності та інших важливих властивостей бетону, ефективним є використання модифікуючих добавок [36]. Модифікуючі добавки здатні регулювати та змінювати властивості бетонних сумішей та самих бетонів – збільшення рухомості суміші при сталому В/Ц, забезпечувати повітрявтягуваність, прискорення або сповільнення твердіння, здатність працювати за умов підвищеної та пониженої температури та інші [37]. Використання добавок-модифікаторів є одним з найпростіших способів регулювання та поліпшення характеристик бетонів всіх типів, що викликається впливом на їх структуру [38, 39].

Відповідно до ДСТУ Б В.2.7-171:2008 [40] розділяють три основні види добавок-модифікаторів в залежно від їх дії: добавки, що регулюють властивості бетонних сумішей; добавки, що змінюють властивості бетонних сумішей; добавки, що надають спеціальні властивості бетонним сумішам. За механізмом дії В.Б. Ратінов [41] розділив добавки-модифікатори на чотири групи: електроліти, які змінюють розчинність в'язучого бетонної суміші; добавки, які реагують з в'язучим з наступним утворення нових речовин; поверхнево-активні речовини (ПАВ), які збільшують рухомість суміші; готові речовини.

До найбільш розповсюджених добавок-модифікаторів відносять поверхнево-активні речовини (пластифікатори та більш ефективні суперпластифікатори), які здатні підвищити рухомість бетонної суміші при незмінному В/Ц. Це дозволяє підвищити зручність укладання суміші, поліпшити її ущільнюваність, не знижуючи міцності утвореного бетону [42]. На сьогоднішній день фактично увесь бетон виготовляється із додаванням таких

пластифікуючих добавок, тому що це дозволяє суттєво поліпшити міцність матеріалу без побічних ефектів. Добавки іншої дії додаються опціонально. За хімічною природою пластифікуючі добавки є переважно аніонактивними органічними речовинами колоїдного розміру з великою кількістю полярних груп в ланцюзі [43].

За умов сьогоденного стану розвитку хімічної галузі у сфері виготовлення будівельних матеріалів, найбільш ефективними добавками суперпластифікаторами вважаються добавки полікарбоксилатного типу. Окрім суттєвого підвищення рухомості бетонної суміші, такі добавки дозволяють збільшити міцність та зносостійкість, а також підвищити хімічну стійкість бетону [43]. Суперпластифікатори фактично є обов'язковим компонентом сучасних високоефективних бетонів [44, 45]. Добавки суперпластифікатори такого типу використовувались при виготовленні експериментальних бетонів в рамках чинного дисертаційного дослідження.

Про високу ефективність суперпластифікаторів на основі полікарбоксилатів свідчать результати вітчизняних та зарубіжних досліджень. В останні роки було проведено цілу низку експериментів з вивчення властивостей полікарбоксилатів, їх взаємодію з різними видами цементу та заповнювачами у бетонах дорожнього будівництва. Використання суперпластифікуючих добавок дозволяє суттєво підвищити міцність бетонів або досягти значної економії цементу ($30 \dots 85 \text{ кг/м}^3$) при збереженні початкової міцності бетону [46].

В рамках досліджень [47] на основі цементу ПЦ II/A-III400 у якості в'язучого було виготовлено бетони дорожніх покриттів класів міцності B25 та B30. В ході подальших експериментів [36] досліджено бетони на аналогічному цементі та заповнювачах із додаванням полікарбоксилатів; міцність таких бетонів була збільшена до класів B30 та B40 відповідно. В дослідженнях [48] завдяки додаванню суперпластифікатору полікарбоксилатного типу MasterGlenium SKY 608 було отримано високоміцні бетони класів C50/60 та C40/50 на основі цементів ПЦ II/A-III-500 та ПЦ IV/A-500 P відповідно.

До розповсюджених модифікуючих добавок також варто віднести добавки, що пришвидшують терміни твердіння бетонної суміші, що є важливою властивістю для ремонтів дорожніх та аеродромних покриттів; добавки, що сповільнюють терміни твердіння бетонної суміші, це дозволяє збільшити відстань доставки бетонної суміші з заводу до будівельного майданчика та в умовах жаркого клімату; добавки що знижують температуру замерзання бетонної суміші, що дозволяє вести бетонування за умов температури нижче 0 °С [43].

Дослідження [49] показали, що зниження часу твердіння матеріалу для жорстких дорожніх покриттів без погіршення їх фізико-механічних та експлуатаційних характеристик може бути досягнуто за рахунок введення до його складу раціональної кількості пластифікуючої добавки С-3 спільно з поліпропіленою фіброю та прискорювачем твердіння Na_2CO_3 . Раціонально підібраний склад дозволив значно скоротити час твердіння бетону в початкові терміни твердіння, отже, зменшити час простою дороги при будівництві та ремонті. Виходячи з екологічності та високої швидкості набору міцності, запропонований матеріал також був рекомендований для будівництва велосипедних доріжок та пішохідних тротуарів.

Для модифікування деяких властивостей бетонів для дорожнього будівництва сьогодні часто використовується дисперсне армування. Це дозволяє покращити міцнісні характеристики бетону, а саме міцність на стиск, значно збільшити міцність на розтяг, морозостійкість, ударостійкість та стійкість до стирання [50-52]. У якості фібри для дисперсного армування використовується волокна, виготовлені з різних матеріалів – сталі, полімерів (поліпропілену, поліетилену, нейлону, акрилу, поліефіру та інші), скла, вуглецю, базальту, азбесту та інших. Фібра може відрізнятися довжиною, товщиною та форм-фактором в залежності від цільового призначення [53, 54].

Використання фібри у якості дисперсного армування дозволяє значно покращити механічні властивості бетону – в першу чергу знизити крихкість, притаманну цементному каменю [53]. Більш того, волокна фібри, розподілені в

цементно-піщаній матриці бетону перерозподіляють навантаження від механічних та температурних впливів, перешкоджають переміщення окремих дислокацій та перешкоджають виникненню та розповсюдженню тріщин. Як результат це призводить в першу чергу до збільшення міцності бетону на розтяг та стійкості до впливу удару, стійкості до стирання, підвищенню морозостійкості композиту, що є найважливішими критеріями міцності для дорожніх бетонів. В порівнянні зі звичайним, бетон з дисперсним армуванням має також вищий модуль пружності, тріщиностійкість, вогнестійкість, стійкість до атмосферних впливів, меншу усадку [55, 56].

Велика кількість ефективних бетонів з дисперсним армуванням волокнами фібри різних видів була розроблена і впроваджена вітчизняними та зарубіжними дослідниками. В рамках досліджень [37] було отримано бетони для аеродромних покриттів з показником морозостійкості F600 шляхом введення пластифікуючої добавки полікарбонатату та поліпропіленової фібри. В дослідженнях [57] шляхом введення поліолефінових волокон та пластифікатору вдалось досягти зниженню В/Ц суміші для дорожніх бетонів та в результаті призвело до збільшення міцності бетону на розтяг на 19-29%. В дослідження [58] завдяки використанню високоефективних суперпластифікаторів одночасно з дисперсним армуванням, вдалось отримати продуктивні фібробетони з ущільненою структурою для швидкого ремонту дорожніх покриттів з високим рівнем вимог до матеріалу.

Для дорожніх бетонів часто використовується металева фібра в якості дисперсного армування. В ході низки досліджень вона показала свою ефективність для суттєвого підвищення міцності бетону на розтяг, тріщиностійкості та стійкості до стирання та навіть підвищення міцності бетону на стиск [59]. В ході досліджень [60, 61] вдалось скоротити товщину шару цементобетонного дорожнього покриття без втрати експлуатаційних властивостей завдяки використанню сталеві фібри. Проте, не дивлячись на значне покращення міцностних характеристик бетону для дорожніх покриттів, використання металевої фібри має певні недоліки при експлуатації. При стиранні

захисного шару бетону і оголенні, металева фібра здатна пошкодити колесо та утворювати шум під час руху автомобіля [62]. Більш того, в регіонах, де практикується посипання проїжджої частини сіллю для боротьби з обледенінням в зимовий період, спостерігається швидка корозія сталевих волокон і руйнування поверхневого шару покриття [63]. Дослідженнями [64] доведено, що в умовах клімату України для дорожніх бетонів раціональніше використовувати фібру з поліпропіленових волокон яка не схильна до корозії під дією атмосферних впливів навколишнього середовища.

Дослідниками Одеської державної академії будівництва та архітектури (Україна) та University North (Хорватія) з використанням методів оптимального планування експерименту були проведені дослідження [65], що дозволили визначити комплексний вплив кількості цементу, суперпластифікатора та поліпропіленової фібри на міцність, стирання та морозостійкість бетону для жорстких дорожніх покриттів. Встановлено, що застосування раціональної кількості суперпластифікатора та поліпропіленової фібри довжиною 39 мм призводить до збільшення міцності, зносостійкості і морозостійкості бетону. При застосуванні раціональної кількості дисперсної арматури і суперпластифікатора бетони навіть з кількістю цементу 350 кг/м^3 мали міцність на стиск не менше 65 МПа, міцність на розтяг при згині не менше 6,0 МПа, морозостійкість F200 і показник стирання близько $0,30 \text{ г/см}^2$.

Фібробетони з високою швидкістю твердіння є ефективними також для ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів, тому що дозволяють знизити терміни введення покриття в експлуатацію після ремонту. Наприклад у [66] досліджено вплив прискорювача твердіння та кількості металевої фібри на міцність, морозостійкість, стійкість до стирання та усадку фібробетону для ремонту жорстких дорожніх покриттів. Розроблено оптимальні склади фібробетону, які мають знижену усадку при твердінні, міцність на стиск у віці 2 діб не менше 55 МПа, міцність на розтяг при згині не менше 8,5 МПа. У проектному віці міцність фібробетону на стиск становить 85-90 МПа, на згин

15,5-17,5 МПа, морозостійкість F200, стиранисть не вище 0,24 г/см², що забезпечує високу довговічність ремонтного бетону.

В ході досліджень [67] доведено, що одним із шляхів отримання ефективних високоміцних бетонів є використання надшвидкотверднучих композицій портландцементу в поєднанні з ефективними пластифікуючими добавками. Показана можливість виготовлення таких бетонів на основі звичайного портландцементу із модифікуванням цементної матриці частинками фази С-S-H та суперпластифікатором полікарбоксилатного типу. Завдяки використанню модифікованого в'язучого та суперпластифікаторів отримано бетону міцністю на стиск 84,8 МПа. При цьому модифікація портландцементу комплексними наномодифікаторами, які містять наночастинки С-S-H та полікарбоксилатний суперпластифікатор, дозволяє прискорити швидкість твердіння суміші.

В дослідженнях [68] вивчалась дія повітровтягуючої добавки в бетонах для дорожнього будівництва. Було розроблено склади з додаванням повітровтягуючої добавки та базальтової фібри в якості дисперсного армування. Міцність бетонів на стиск знаходилася в діапазоні від 46,3 МПа до 63,2 МПа, міцність бетонів на розтяг при згині – в діапазоні від 5,83 МПа до 7,63 МПа. Додавання повітровтягуючої добавки практично не вплинуло на міцність бетону на розтяг при згині, проте викликало зниження міцності на стиск на 2–16 % при використанні 0,05 % добавки і на 9–21 % при використанні 0,15 % добавки. Стиранисть бетону, виготовленого з додаванням повітровтягуючої добавки, практично не змінилося, а при використанні базальтової фібри знижується на 14–15 %, що сприяє збільшенню довговічності матеріалу. За рахунок введення повітровтягуючої добавки і дисперсного армування морозостійкість бетону досягла F300. Тобто додавання повітровтягуючої добавки позитивно впливає на підвищенні морозостійкості бетону. Проте, за умови використання вторинних бетонних заповнювачів для виготовлення бетонів, додавання повітровтягуючої добавки не є доцільним оскільки такі заповнювачі самі мають високу пористість, що впливає на зниження густини бетонів, особливо за умови використання вторинних бетонних заповнювачів дрібної фракції для заміщення піску.

Враховуючи значні переваги та несуттєві недоліки цементобетонного дорожнього покриття, можна зробити висновок, що облаштування доріг такого типу є перспективним для використання в Україні та світі в цілому. Беручи до уваги, що дорожні бетони із використанням вторинних заповнювачів та інших альтернативних матеріалів при випробуванні показують задовільні результати для експлуатування, доцільним є використання бетонів таких складів для дорожнього будівництва, зокрема для основ дорожнього одягу.

В цілому проведений аналіз показує, що цементобетонні дорожні покриття є оптимальними для їх використання в Україні у зв'язку з їх властивостями, довговічністю, підвищеною міцністю та можливістю використовувати в умовах жаркого клімату. Показники міцності таких доріг повністю задовольняють вимоги нормативної документації України. Використання бетонних основ дозволяє додатково підвищити міцність жорсткого дорожнього одягу та значно підвищує його довговічність.

Основними рецептурними прийомами, що використовуються для покращення властивостей бетонів жорстких дорожніх покриттів та основ дорожнього одягу, є використання раціональної кількості суперпластифікаторів, повітровтягуючих добавок і дисперсного армування.

1.3 Світова практика використання вторинних заповнювачів для виготовлення бетону

У наш час людство все частіше стикається з проблемою переробки бетонного брухту та демонтованих залізобетонних та інших будівельних конструкцій. Актуальність теми посилюється тим, що будівлі, які масово зводилися у другій половині ХХ ст., застарілі фізично та морально, поступово виводяться з експлуатації. ХХІ століття принесло людству економічне та культурне піднесення, розвиток нових архітектурних стилів та тенденцій в містобудуванні. Це призвело до прагнення реконструкції та реновації будівель і цілих районів. Внаслідок цього виникає велика кількість будівельних відходів в

результаті демонтажу будівель і споруд. Наприклад лише у Франції у 2008 р. було отримано 38,2 млн. тон бетонного брухту [69], у США – 143 млн. тон і ця цифра щорічно зростає [70]. Єдиним вірним рішенням є утилізація та повторне використання бетонних відходів, їх складання на полігонах є недопустимим.

У 2016 році в Європі було утворено приблизно 925 мільйонів тон будівельних відходів та продуктів демонтажу будівель [71]. Для виконання вказівок Директиви управління відходами Європейського парламенту щодо будівельних відходів за період до 2020 року держави-члени Євросоюзу мали збільшити рівень використання нешкідливих матеріалів до 70% за вагою. Прийняття таких норм активізувало дослідження за тематикою технології переробки та використання будівельних відходів, в першу чергу вторинних бетонних заповнювачів.

В Україні дуже велика кількість будівельних відходів виникає в результаті бойових дій, зокрема ракетних обстрілів міст. Утворюється велика кількість сировини, яка при правильній обробці здатна стати новим будівельним матеріалом, а саме вторинним бетонним заповнювачем. Все вищезазначене вказує на доступність вторинних бетонних заповнювачів в якості сировини для виготовлення бетону.

Тому актуальними є дослідження щодо використання вторинного щебеню та піску, які отримують переробкою бетонного та іншого будівельного брухту. Наприклад у [72] такий щебінь пропонується використовувати для влаштування нижніх шарів цементобетонних дорожніх покриттів.

Потреби в будівельних матеріалах доцільно покривати з максимальним використанням вторинних ресурсів для їх виробництва. Широке використання вторинного щебеню і піску дозволить не тільки вирішити проблему переробки бетонних відходів, що надходять, але й рекультивувати звалища будівельного сміття [73]. Для України це ще більш актуально через великий обсяг бетонного лому та інших відходів, що як зазначено вище, були отримані в результаті бойових дій.

Для України тематика використання вторинних заповнювачів крупної та дрібної фракції для виготовлення бетону є актуальнішою також через необхідність в будівельних матеріалах для подальшої відбудови та реконструкції держави, зокрема для відновлення інфраструктури. Важливо знайти оптимальні шляхи утилізації та повторного використання бетонного лому, цегляної кладки та інших видів будівельних відходів.

Незважаючи на наявність гранітних кар'єрів з великими покладами сировини для виготовлення гранітного щебеню, використання вторинної сировини є більш економічно та екологічно привабливим. По-перше, видобуток граніту кар'єрним шляхом виснажує природні ресурси та змінює локальну екосистему. Видобуток річкового піску також задає непоправної шкоди режиму річок, а запаси такого піску в Україні відносно невеликі. По-друге, сам процес виготовлення вторинних заповнювачів є менш енергетично-ємними (до 8 разів) [74], що зменшує використання енергоносіїв, позитивно відображається на зменшенні викидів вуглекислого та сірчаного газу та інших забруднювачів в атмосферу. Це дуже важливо враховувати, оскільки будівельна індустрія є найбільшою причиною викидів CO₂ та інших оксидів в атмосферу, що викликає зміни клімату [74]. По-третє, як вказано вище, шляхом повторного використання, вирішується питання захоронення та зберігання відходів на полігонах. Крім вторинного щебеню можливе і доцільне використання іншої вторинної сировини, наприклад цементу з високою зольністю та вмістом шлаків металургійного виробництва.

Методи вторинного використання відходів, зокрема використання вторинного щебеню з подрібненого бетонного брухту, з кожним роком стають все більш досконаліми. Для багатьох країн, які не мають родовищ граніту або гравію, обсяги імпортованого наповнювача бетону можна скоротити за рахунок використання вторинного щебеню. Проблема утворення промислових відходів також може бути вирішена шляхом їх використання в будівельній галузі, у тому числі у виді заповнювачів бетону різної фракції [75].

За даними [76], внаслідок знесення, реконструкції та будівництва нових будівель і споруд утворюються такі будівельні відходи, як бетонний та залізобетонний лом, засмічений ґрунт, відходи каменю, асфальту, деревини, кераміки та скла. Використання будівельного сміття в промисловості здешевлює кінцеву продукцію, оскільки такі відходи є безкоштовною та екологічно чистою сировиною, більш того економляться потужності земельної ділянки за рахунок відсутності відходів на полігонах, що як показано вище покращує екологічну ситуацію.

Слід розуміти, що в окремих випадках переробка будівельного сміття, що утворюється при знесенні застарілих і зношених будівель і споруд, є більш витратною, ніж виготовлення щебеню з гірських порід. Це пов'язано з необхідністю проведення передмонтажних робіт, використання більш потужного і дорогого обладнання, виключення арматури та інше. Однак, якщо врахувати витрати, пов'язані з утилізацією будівельного сміття (витрати на транспортування, витрати на захоронення, шкоду навколишньому середовищу, спричинену забрудненням землі, відносно шкоду навколишньому середовищу, спричинену викидами під час транспортування та необхідність виділення землі для полігону), вторинний щебінь зазвичай є на 15-20 % дешевший ніж звичайний щебінь. Також як показано вище, виготовлення вторинного щебеню є менш енерго-затратним в порівнянні з щебенем гранітним, що дозволяє знизити викиди вуглецевого газу від роботи електростанцій в атмосферу. Природний гранітний щебінь – ресурс вичерпний та його видобуток здатен завдати шкоди екосистемі у зв'язку зі зміною ландшафту на місці кар'єрів.

Витрати на підготовку та якість вторинного щебеню залежать від способу знесення будівель і споруд (знесення, вибух, демонтаж), типу дробильної станції (шнеково-бурова, роторна, трубна тощо), роздільності сортування матеріалу перед дроблення і деяких інших факторів [77]. Економічно найбільш доцільною є переробка бетону і залізобетону, що залишився від знесених будівель. Наприклад використання вторинного щебеню в дорожніх роботах для підстильного шару виявилось ефективним [78].

Вторинний щебінь, отриманий з бетонних відходів, являє собою природний гранітний щебінь з частинками цементного розчину. Його властивості залежать як від властивостей граніту, так і бетону. У зв'язку з технологічним процесом подрібнення бетонного лому та для доцільності подальшого використання вторинного щебеню, у країнах Європейського Союзу найчастіше виділяють наступні фракції матеріалу: 0-8 мм, 8-16 мм, 10-22 мм, 16-63 мм. В Україні використовують переважно фракції 0-5 мм, 5-10 мм, 5-20 мм, 10-20 мм, 20-40 мм і 40-70 мм [79].

В залежності від фракції, сировина може використовуватися в якості крупного та дрібного заповнювача, підсипки, дренажу та для облаштування основ. Вторинний щебінь має дещо відмінні властивості у порівнянні зі звичайним гранітним – він має вище водопоглинання, вищу пиловатість та нижчу міцність на подрібнюваність. Для визначення вищевказаних характеристик, було проведено дослідження [80] властивостей вторинного щебеню із подрібнених залізобетонних конструкцій фракції 5-20 мм та 40-70 мм. Встановлено, що водопоглинання вторинного щебеню становить 1,5% та не залежить від розміру фракцій. Кількість пилоподібних і глинистих частинок у вторинному щебені не перевищують середніх значень і становлять 1,1% для фракцій 5-20 мм і 0,8 % для фракцій 40-70 мм. Це означає, що зменшення розміру фракції призводить до збільшення об'єму пилоподібних і глинистих частинок. Враховуючи, що згідно вимог до крупного заповнювача гранично допустиме значення вмісту пилоподібних та глинистих часток становить 3%, досліджений вторинний щебінь був придатним для використання в якості заповнювача бетону. Також встановлено, що характеристики міцності щебеню фракції 5-20 мм відповідають нормам для виготовлення бетону марки М400-М600, а для виробництва виробів з такого важкого бетону достатньо використовувати заповнювач з бетону марки 300 [80].

У [81] проведені дослідження властивостей бетону, крупний заповнювач якого на 20 %, 40 %, 60 %, 80 % та 100 % був замінений з гранітного щебеню на вторинний, а цемент частково (від 5 % до 25 %) замінений продуктом обпалення

термітної глини (кальцинованого термітнику). Встановлено, що додавання вторинних заповнювачів або термітнику призводить до зниження міцності бетону на стиск. Проте склад бетону з 60 % вторинного щебеню, 40 % гранітного щебеню і з 5 % кальцинованого термітнику є придатними для створення конструктивних несучих елементів. Також були розроблені інші оптимальні суміші з більшим вмістом вторинного заповнювача. Їх міцність сягала 19 МПа, що не дозволяє використовувати бетон для відповідальних несучих конструкцій. Проте показники міцності вищезазначеного бетону дозволяють використовувати його для будівництва ненесучих конструкцій та конструкцій з невисокою відповідальністю, для облаштування фундаментів, відмосток, тротуарів, основ дорожнього одягу, тощо.

У [82] показано, що в Україні є сировина та технологічні можливості для виготовлення вторинних заповнювачів, що актуально у зв'язку з необхідністю утилізації відходів демонтованих та зруйнованих будівель, рекультивації полігонів та інших екологічних та економічних аспектів. У [83] показана можливість використання вторинних бетонних заповнювачів для виготовлення широкої номенклатури будівельних конструкцій – фундаментних блоків, перемичок, ригелів, сходових маршів тощо. Встановлено, що використовуючи вторинний щебінь в якості крупного заповнювачу, є можливість досягнути класу міцності бетону за стиском С25/30. Більш того вторинний щебінь різних фракцій є цінним матеріалом не тільки для виготовлення бетонів, але і для інших будівельних цілей – облаштування автостоянок, паркових доріжок, облаштування дренажу, покриття заміських маловикористовуваних доріг, тощо.

На сьогоднішній день бетон на основі вторинних заповнювачів вже використовувався при будівництві багатьох об'єктів по всьому світу, до найбільш відомих варто віднести [84]:

Дорожнє покриття і основа автостради Лахті, Фінляндія. У світлі запровадження податку на відходи в Фінляндії у 1998 році було виконано кілька проектів, в яких вторинні бетонні заповнювачі використовувалися в бетонах основ і покриттів доріг. Одним із таких проектів стала автомагістраль Лахті, яка

відноситься до високої категорії в системі доріг Фінляндії. У 1998 році для будівництва основи для асфальтового покриття 2-кілометрової поздовжньої ділянки автомагістралі було використано близько 20 тис. тонн вторинних бетонних заповнювачів. Несучу здатність конструкції автомагістралі було спроектовано таким чином, щоб вона збільшилася з 300 МПа (нормальна розрахункова міцність конструкції) до 400 МПа впродовж часу. Під час випробувань, проведених в травні 2000 року, було встановлено, що модуль пружності бетону автомагістралі досяг 689 МПа і, як очікується, збільшиться ще завдяки властивостям самоцементатації вторинних бетонних заповнювачів, що збільшить термін служби автомагістралі (ETN, 2000) [85];

Шари основи покриття в міжнародному аеропорту Лісабона, Португалія.

В міжнародному аеропорту Лісабона проводилась реконструкція однієї з платформ, руліжних доріжок та місця паркування літаків. В процесі було демонтовано велику кількість бетону, який після переробки було використано у якості вторинних бетонних заповнювачів при облаштуванні основи аеродромних покриттів (рис.1.2). Подрібнений заповнювач мав максимальний розмір 40 мм і розподіл частинок за розміром у стандартному діапазоні. Середня густина щебеню у сухому стані становили 2026-2116 кг/м³, а водопоглинання – 6,7-9,0 %. Приблизний обсяг отриманих вторинних бетонних заповнювачів, використаних при реконструкції аеропорту, склав 25 000 м³, що зменшило споживання енергії та викиди вуглекислого газу під час видобутку та транспортування природних ресурсів до будівельного майданчика. За оцінками фахівців це дозволило заощадити близько 500 000 євро [86].



Рис. 1.2 Подрібнення демонтованого бетону в міжнародному аеропорті Лісабону [86]

Відновлення траншеї для підземних комунікацій, Сінгапур. Уряд Сінгапуру активно заохочує переробку відходів бетону і використання їх у новому будівництві. Хоча є практика використання вторинних заповнювачів у будівництві доріг, існує обмежене використання дрібнішої фракції сировини. Samwoh Corporation Pte Ltd, Land Transport Authority і SP Power Grid провели спільне дослідження, щоб оцінити використання крупного та дрібного вторинного заповнювача для відновлення траншеї. Вторинні заповнювачі, які отримували з бетонних відходів, склалися в основному з граніту та цементно-піщаного розчину, присутнього в бетоні. Результати тестування характеристик матеріалів показали, що як природній гранітний щебінь, так і вторинні заповнювачі відповідали вимогам і не показали жодних істотних відмінностей щодо міцності та стійкості до стирання. Крім того, вторинний заповнювач виявився менш лускатим і витягнутим, ніж гранітний, що полегшує ущільнення матеріалу. Максимальна суха густина шару гранітної основи становила 2170 кг/м^3 при оптимальному вмісті води 8%, тоді як максимальна густина шару основи з вторинного заповнювача становила 1850 кг/м^3 при оптимальній вологості 17%. Всього було побудовано три ділянки траншеї для підземних комунікацій загальною довжиною 300 м [87].

Хвилеріз, Нідерланди. Близько 720 тон вторинного заповнювача з подрібненої керамічної кладки та бетону фракції 50-150 мм було використано

при будівництві берегозахисної гідротехнічної споруди Ventjagersplaat, поблизу гирла річки Haringvliet на південному заході Нідерландів. Вторинний заповнювач, який складався приблизно з 60% подрібненої кладки і 40% подрібненого бетону, використовували в для облаштування серцевини 150-метрового хвилелому. Було виявлено, що перероблений матеріал не показав суттєвої різниці в порівнянні зі звичайним природним аналогом і був придатним для транспортування та роботи з ним. При будівництві Ventjagersplaat автори проекту дійшли висновку, що вторинні заповнювачі є хорошою альтернативою традиційним з технічної та економічної точки зору, оскільки 1 м³ вторинного заповнювача на 20% дешевше природного [88].

Ньюпортська південна розподільна дорога, Велика Британія. Дорога довжиною 9,5 кілометрів була побудована від Даффра, що на західній стороні Ньюпорта, до кільцевої розв'язки Coldra на сході. Проект включає в себе новий міст через річку Уск і модернізацію існуючих доріг до чотирьох смуг. На етапі проектування була поставлена ціль максимального використання місцевих матеріалів та вторинних заповнювачів бетону. За підрахунками непряма економія до 941 360 фунтів стерлінгів відбулася завдяки уникненню плати за утилізацію відходів і податків на звалища. Пряма та непряма економія від використання перероблених матеріалів у проекті Newport Southern Distributor Road склала 1 975 495 фунтів стерлінгів. Окрім значних економічних переваг від використання локально доступних вторинних бетонних заповнювачів було отримано екологічні переваги – зменшення використання природних ресурсів, зниження перевезень на великі відстані, популяризація та просування корисних для навколишнього середовища практик [89].

Жорстке дорожнє покриття в Сент-Луїсі, Міссурі, США. Бетонний лом, отриманий із при реконструкції Міжнародного аеропорту Ламберта в Сент-Луїсі, був подрібнений і розділений на дрібну та крупну фракцію. Вторинні бетонні заповнювачі були використані для будівництва експериментальної ділянки дороги довжиною 300 м, що складається з бетонного узбіччя шириною 3 м, смуги руху шириною 3,6 м і кювету шириною 150 мм в кожному напрямку. Було

перевірено дві пропорції суміші з 30 % і 40 % вторинного бетонного заповнювача крупної фракції. Жодних проблем із укладанням і обробкою такого бетону не спостерігалося. 91-денна міцність на стиск знизилася на 7% і 12% після введення 30 % і 40 % вторинних заповнювачів: 39,8 МПа і 37,5 МПа відповідно, порівняно з 42,6 МПа для еталонного бетону на природному заповнювачі. Еталонна суміш і суміш із 30 % вторинного бетонного заповнювача мали однакову усадку та проникність для іонів хлориду через 28 днів. Усі суміші показали хорошу стійкість до циклів заморожування та відтаювання. Жодна із сумішей не показала істотних відмінностей щодо деформації [90].

Автомагістраль А1 Зальцбург-Відень з жорстким цементобетонним покриттям, Австрія. А1 є головною магістраллю Австрії зі сходу на захід. Вона має середньодобовий трафік від 55 000 до 110 000 автомобілів, з яких 12% – 15 % припадає на вантажівки. У 1991 р була почата реконструкція магістралі. Використання природного гранітного щебеню для реконструкції 300 км автомагістралі вважалося марнуванням природних ресурсів, тому було запропоновано використати відходи зі старого покриття. Новий бетон був виготовлений із суміші вторинних бетонних заповнювачів фракцією 4-32 мм та природного заповнювача із граніту фракції 0-4 мм. Кількість цементу у суміші складала 365 кг/м³. Використання бетону на вторинних заповнювачах дозволило зекономити 5 % коштів та мало низку переваг для навколишнього середовища. Успіх цього проекту призвів до того, що в Австрії та інших європейських країнах укладання двошарового покриття з використанням вторинних бетонних заповнювачів у нижньому шарі стало стандартною практикою [91].

Офісна будівля в Мангейм-Нойостгайм, Німеччина. Проект будівництва офісної будівлі у Мангеймі (рис. 1.3), завершений у квітні 2016 року, був ініційований у зв'язку з використанням вторинних заповнювачів для виготовлення бетону для несучих конструкцій. Для будівництва споруди було використано приблизно 1400 м³ бетону С20/25 та С25/30 для стін, плит перекриття та фундаменту [92].

Житловий будинок Waldspirale в Дармштадті в Німеччині. В ньому знаходяться 105 квартир, паркінг, торгові приміщення та інше. У найвищій точці будівля має 12 поверхів (рис. 1.4). Проект «Waldspirale» був побудований з використанням вторинних бетонних заповнювачів, для якого розроблено та реалізовано метод контролю якості. Для фундаментів використовувалася бетонна суміш класу C25/30 з розпливом 360-380 мм. Для стін, плит і колон використовувалася бетонна суміш класу C25/30 з розпливом 400-420 мм. Результати випробувань показали, що всі бетонні суміші досягли цільового класу міцності або навіть виявилися міцнішими за проектну. Середнє значення міцності на стиск становило 52,3 МПа, що значно перевищує показники для класу C25/30 [93].



Рис. 1.3 Офісна будівля в Мангейм-Нойостгайм [92]



Рис. 1.4 Житловий будинок Waldspirale в Дармштадті [94]

Таким чином проаналізовані дослідження з питань демонтажу залізобетонних конструкцій показують, що з бетонного брухту технологічно можливо видобувати високоякісний вторинний щебінь [77].

Характеристики міцності бетону з крупнозернистим заповнювачем у вигляді вторинного щебеню у більшості випадків не дозволяють виготовляти з нього критичні несучі залізобетонні конструкції, але його можливо використовувати в дорожньому будівництві для влаштування основ і нижніх шарів цементобетонних покриттів [95, 96]. При цьому актуальними є подальші

дослідження варіювання різновидів вторинних заповнювачів, їх фракцій та оптимізація складів для поліпшення властивостей бетонів на їх основі.

1.4 Властивості складів та особливості технологічних рішень при виготовленні бетонів із вторинних заповнювачів для дорожнього будівництва

Аналізуючи досвід використання вторинних заповнювачів бетону, варто відокремлювати різні види такої сировини. До найбільш розповсюджених варто віднести вторинні заповнювачі на основі подрібнених залізобетонних конструкцій, вторинні заповнювачі на основі цегляної кладки та змішані вторинні заповнювачі, до складу яких може входити перелічені вище матеріали та частини кераміки, штукатурки, скла, газобетону та інше. Важливо наголосити, що до складу вторинних заповнювачів для виробництва бетону не може входити гіпс у зв'язку із його властивостями вступати в повільну хімічну реакцію при довготривалому контакті з водою. Тому технологія зносу будівель або окремих конструкцій повинна передбачати попереднє відокремлення гіпсових покриттів перед процесом демонтажу. Змішані вторинні заповнювачі найраціональніше використовувати для виконання шарів основи дорожнього покриття через несучу здатність, яку вони забезпечують.

Вторинний заповнювач із переробленого бетону переважно є найбільш якісним серед інших вторинних. У деяких країнах, в тому числі в ЄС, розроблені специфікації, які регламентують їх використання [97]. Використання такої сировини для будівництва доріг та бетону для залізобетонних конструкцій стає все ширшим [98].

В той же час важливо вивчати сировину і з точки зору безпечності її використання на наявність шкідливих елементів для здоров'я людини та навколишнього середовища. Для сировини для виготовлення бетону є обмеження щодо наявності сульфатів, а для дорожнього будівництва – важких металів [99, 100]. Гальвін та ін. проаналізували чотири різні партії змішаного

вторинного заповнювачу для використання для дорожнього будівництва, дійшовши висновку, що всі партії можна класифікувати як нешкідливі відходи, вони не містили високої концентрації сульфату, мали не високий вміст штукатурки та керамічних матеріалів [101]. Результати досліджень [102] показали, що використання вторинного заповнювачу з відновленого асфальтового покриття в цементобетоні має економічні, соціальні та екологічні переваги на етапі виробництва матеріалів і будівництва. У цьому сенсі впровадження оцінки життєвого циклу бетону, і в тому числі відходів бетону, у будівельному секторі може забезпечити розробку економічних стратегій, які здатні заохотити ефективне використання ресурсів шляхом зменшення високого впливу на навколишнє середовище [75].

У дослідженні [103] було встановлено, що бетонні суміші на основі вторинних бетонних заповнювачів мають нижчу рухомість та здатність до самоущільнювання в порівнянні зі сумішами на основі первинних природних заповнювачів. Це обумовлене високим водопоглинанням сировини. S. C. Kou та ін. за результатами своїх досліджень [102] зазначали, що вторинний заповнювач дрібної фракції має вище поглинання, ніж річковий пісок, тому необхідно більше вільної води, щоб зробити суміш більш текучою, що в кінцевому підсумку скасується на зниженні міцності бетону. Проте у дослідженні C.S. Poon [104] не було виявлено значного впливу на міцність на стиск та розтяг при заміні вторинними бетонними заповнювачами у кількості 25 % та 50 % крупних і дрібних природних заповнювачів.

У декількох дослідженнях механічних властивостей бетонів на основі вторинних заповнювачів було визначено їх середню густину, міцність на стиск, водопоглинання та стійкість до стирання [105, 102]. Встановлено, що збільшення частки вторинних заповнювачів у складі знижує середню густину, міцність на стиск та стійкість до стирання бетону, підвищує його водопоглинання. Так при заміні 75 % природного щебеню на вторинний заповнювач відбулось зниження середньої густини та міцності бетону на стиск на 0,6 % і 27,8 % відповідно, зниження стійкості до стирання на 11,9 %, збільшення водопоглинання на 60 %.

Тобто зміна властивостей бетону була не суттєвою. Проте при заміні 100 % річкового піску на дрібну фракцію вторинного бетонного заповнювача відбулося зниження середньої густини та міцності на стиск на 8,2 % і 27,8 %, підвищення водопоглинання на 182 % і зниження стійкості до стирання на 70,8 %. Але при заміщенні до 40 % піску на дрібну фракцію вторинного заповнювача також не було суттєвих змін у властивостях бетону. Зменшення міцності на стиск бетону відбулося через високе водопоглинання вторинних заповнювачів, особливо дрібної фракції, що призвело до надлишкової води в суміші та підвищенню В/Ц. S. C. Kou зазначає [102], що кількість додаткової води та цементу залежать від форми, текстури, сортності та вмісту пилу в вторинному бетонному заповнювачі. Інше дослідження, проведене Н. М. М. Schurr та ін. [106] пояснюють, що нижча об'ємна густина і різниця в гранулометричному складі заповнювачів можуть бути причиною зниження міцності на стиск.

Водопоглинання зразків бетону очікувано збільшується зі збільшенням вмісту вторинних заповнювачів через наявність налиплого розчину на фрагменти каменю. Як показано вище, у [102] для зразків із використанням вторинного заповнювачу крупної фракції водопоглинання зросло на 60 %, тоді як для зразків із використанням дрібної фракції вторинного заповнювачу збільшення водопоглинання становило 182 %. Вторинний заповнювач дрібної фракції має більшу абсорбцію, ніж річковий пісок, тому, як наслідок, в суміші опиняється більше надлишкової води для забезпечення її рухомості. Це в кінцевому підсумку підвищує час можливого використання бетонної суміші, проте знижує міцність готового бетону. Водопоглинання крупного та дрібного вторинного бетонного заповнювачу коливається від 3,5 % до 9,2 % і від 5,1 % до 14 % відповідно, що було визначено в дослідженнях С. Leiva [107] та I. Marie [108].

Дослідження [109] також показали, що стійкість до стирання зразків бетону зменшується зі збільшенням вмісту вторинних бетонних заповнювачів. Стирання бетону на основі вторинного заповнювачу крупної фракції є меншим, ніж на основі вторинного заповнювачу дрібної фракції. Нецільно зв'язані зерна

вторинного заповнювачу дрібної фракції є схильними до більшого стирання, ніж річковий пісок. Стійкість до стирання знижується зі збільшенням міцності бетону на стиск. Також в ході вищезазначених досліджень було виявлено, що швидкість проходження ультразвукового імпульсу в бетоні зменшується зі збільшенням відсотка вмісту вторинного заповнювачу. Аналогічний результат спостерігається при зниженні міцності бетону на стиск [109].

У дослідженні L. A. A. Al-Hindavi [110] було виготовлено бетони з вмістом вторинного крупного заповнювача 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % та чистим портландцементом, а також склади з вмістом вторинного крупного заповнювача 0 %, 10 %, 20 %, 30 %, 40 % та з портландцементом з додаванням 67 %, 62 %, 55 % і 52 % шлаку. Зразки бетонів було випробувано на міцність на стиск, міцність на розтяг при згині та міцність на розрив. Дані дослідження показали, що для складів на чистому портландцементі при додаванні 10 %, 20 %, 30 % та 40 % крупного вторинного заповнювача міцність на стиск у віці 28 днів знижувалася на 0,13, 1,25, 3,5 та 10,32 % відповідно (від 31.13 МПа до 27.92 МПа). А для складів з крупними вторинними заповнювачами та цементом із додаванням шлаку міцність на стиск змінювалась від -10.5 % до +12.6 %. Додавання до 30 % крупного вторинного заповнювача несуттєво знижує міцність бетону, а при додаванні більшої кількості втрата міцності бетону все ще є припустимою. Як видно з експериментів з використанням бетонів з додаванням шлаку до цементу, міцність таких бетонів в деяких випадках навіть зростала. Це підтверджує доцільність використання вторинних крупних заповнювачів та цементів зі шлаком для виготовлення бетонів.

Mohit Nandal [111] та інші дослідники вивчали важливість використання подрібненого старого асфальтобетону у якості вторинного заповнювача для бетонів основ дорожнього покриття та інших цілей. Результат дослідження показав, що таку сировину можливо використовувати для виготовлення неміцних бетонів. Для підвищення міцностних характеристик бетону на основі вторинних заповнювачів (міцність на стиск та розтяг, морозостійкість, ударостійкість, стійкість до стирання), дієвим методом може бути зменшення

кількості води у суміші. Завдяки зниженню В/Ц суміші, знизиться кількість мікропор, які утворюються на місці випаровуваної води, що позитивно відображається на міцності готового бетону. Проте, зменшення води знизить рухомість суміші і як результат техологічність. Так, суміш з рухомістю S1 не призначена для перекачування бетононасосом, є мало придатна для вібрування глибинним вібратором в опалубці. Проте суміші з низькою рухомістю є придатними для укладання бетоноукладачами, здатними її провібрувати, що робить такі суміші найбільш ефективними для дорожнього будівництва.

Як показано вище, вторинний заповнювач – це екологічно-приваблива вторинна сировина, яка в довгостроковій перспективі може замінити попит на природний заповнювач, що у свою чергу, призведе до його збереження (граніт, річковий гравій, пісок). Однак більшість бетонних підприємств неохоче виробляють бетон із переробленого заповнювача та відповідно не використовують його максимальний потенціал. Промисловість ще не сприйняла його не лише через невизначені характеристики матеріалу, але й через недосліджені виробничі процеси, які ще належить розробити. Більш того, для швидкого та масового впровадження вторинних бетонних заповнювачів варто продемонструвати і економічну вигоду їх використання. Результати досліджень [112] показують, що незалежно від виробника ціна вторинного бетонного заповнювача не може знизитися нижче ніж на 20% від ціни натурального бетонного заповнювача, що обумовлюється дорожнечою обладнання для подрібнення бетонного лому та відсутністю масштабності виробництва. Використання подрібнювальної установки типу верхнього бункера та типу фронтального завантажувача дозволяє знизити додаткові витрати на перероблення бетонного заповнювача [113].

Проте ряд країн, такі як Таїланд, В'єтнам, Індонезія, які мають обмежені природні мінеральні ресурси, прагнуть до розвинення можливостей використання саме вторинної заповнювачів [114]. Для розрахунку вартості і вигоди від вторинної переробки бетону, важливо врахувати усі додаткові вигоди, окрім прямої економії на різниці вартості сировини. Зрозуміло, що для

фінансової життєздатності виробництва вторинних заповнювачів бетону необхідно впроваджувати виробництво промислового масштабу.

Для збільшення економічної вигоди використання продуктів переробки бетону, варто використовувати не лише крупну фракцію (8-16 мм, 5-20 мм, 16-25 мм і т.д.) вторинного бетонного заповнювача, але і дрібну (0-8 мм, 0-5 мм). Дрібна фракція також утворюється в значній мірі при подрібненні бетонного лому, проте не використовується в значній мірі через відсутність розроблених оптимальних рецептур бетону із такої сировини. Найчастіше вторинні заповнювачі використовуються в бетоні із низькою та середньою міцністю [114].

На додачу до використання вторинного щебеню та піску, Seriki проводив дослідження [115] з використанням бентоніту у якості в'язучого матеріалу. Було виготовлено бетони із частковим заміщенням цементу на бентоніт, у кількості 10 %, 20 % та 30 % та контрольний склад без бентоніту. Зменшенням вмісту цементу покликано метою скорочення викидів CO₂ в атмосферу так як обпалення клінкеру і виготовлення цементу є дуже енергомістким виробництвом. Результат досліджень показав, що заміщення цементу бентонітом у кількості 10 %, 20 % та 30 % знижує міцність бетону на стиск на 39 %, 46 % та 56 % відповідно. Таким чином, використання бентоніту є нераціональним для заміщення цементу у якості в'язучого так як суттєво знижується міцність бетону.

В цілому можна казати, що на даний момент міжнародне наукове співтовариство має недостатнього обсягу знань щодо вибору бетонних складів із вторинного щебеню. В першу чергу, це пов'язано з великою різноманітністю крупних і дрібних заповнювачів, цементу, який може істотно відрізнятись в залежності від регіону або країни виробництва, і широкого асортименту добавок суперпластифікаторів, які представлені на ринку. Поєднання окремих компонентів істотно впливає на властивості бетону. Крім того, тема будівництва доріг з цементобетону є новою для багатьох країн, а кількість бетонного брухту, який отримують внаслідок демонтажу будівель у результаті реновації цілих територій, зростає [116]. Для збільшення використання вторинних ресурсів

доцільно використовувати у якості в'язучого шлакопортландцемент, який має високий вміст золи та шлаків металургійного виробництва (до 60 %) [117].

Найуспішнішим методом впровадження використання нових будівельних матеріалів та сировини є демонстрація довгої та успішної історії їх використання. Протягом останніх років була здійснена певна кількість реальних застосувань вторинних заповнювачів для виготовлення бетону, в тому числі для дорожнього будівництва, досвід яких показав технічну та економічну життєздатність матеріалу, перспективність його використання.

Аналізуючи результати досліджень міжнародної наукової спільноти стосовно використання вторинних заповнювачів для виготовлення бетону можна зробити висновки щодо деяких властивостей таких бетонів. В окремих конструктивах вторинні бетонні заповнювачі можуть замінити значну частину як природного гранітного щебеню або гравію, так і піску. Суттєве зниження міцностних показників у бетонах таких складів не відбувається за умови часткового використання вторинних заповнювачів у поєднанні з природними. Дослідження [118] доводять, що міцність бетонів, які повністю складаються із вторинних заповнювачів крупної та дрібної фракції не знижується суттєво. Це ще раз обґрунтовує можливість використання таких заповнювачів в дорожньому будівництві. Так крупний вторинний заповнювач може замінити до 45% природнього, а дрібний вторинний заповнювач може замінити до 80% річкового піску для виготовлення бетонів для влаштування дорожніх покриттів, бордюрів та тротуарів. Відповідно до даних досліджень, бетон на вторинному заповнювачі показує достатньо високу міцність, що дозволяє говорити про заміну до 100 % природнього заповнювача для виготовлення бетонів основ дорожнього одягу.

Враховуючи високий потенціал сировинної бази та технологічну простоту виробництва вторинних бетонних заповнювачів для виготовлення нових бетонів, варто зробити висновок про перспективність таких бетонів та необхідність наукових пошуків для їх удосконалення. Привабливість використання вторинних заповнювачів підсилюється економічною вигодою та екологічною

ефективністю використання такої сировини у порівнянні з природним гранітним щебенем, річковим гравієм та піском.

Масове використання бетону на основі вторинних заповнювачів, особливо в умовах, що склалися в Україні, можливо в конструкціях, до яких не висувається високих вимог щодо міцності та морозостійкості. До таких конструкцій відносяться основи дорожнього одягу.

Ґрунтуючись на проаналізованих даних, була визначена *робоча гіпотеза досліджень*. З врахуванням значної різниці у властивостях вторинних заповнювачів (крупних та дрібних) підбір оптимальних складів бетонів для будівництва основ дорожніх покриттів слід проводити експериментально. Для досягнення необхідної міцності і морозостійкості досліджуваних бетонів необхідно використовувалися ефективні добавки суперпластифікатори, та за необхідним обґрунтуванням фібру. Експериментальні дослідження слід проводити з використанням великого асортименту вторинних та природних заповнювачів крупної та дрібної фракції на декількох видах цементу, зокрема з різним вмістом шлаку доменних печей для підвищення використання переробленої сировини для виготовлення бетону.

Виходячи з робочої гіпотези та беручи до уваги проведений аналіз наукової літератури з даної галузі, була сформульована *мета роботи*: розробка бетонів основ дорожнього одягу з забезпеченою міцністю та довговічністю при максимальному використанні вторинних заповнювачів.

Завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети, наведені у вступі дисертаційної роботи.

Висновки за 1-м розділом

1. Цементобетонні дорожні покриття є довговічнішими у порівнянні з асфальтобетонними, вони витримують більше навантаження від дії руху автомобільного транспорту. Такі дороги широко використовуються за кордоном та мають перспективи розвитку в Україні. Жорстке дорожнє покриття на відміну

від асфальтобетону не схильне до деформації під дією навантаження колесу автотранспорту навіть в умовах жаркого клімату.

2. Сировинна база України здатна повністю забезпечити необхідність в матеріалах для виготовлення цементобетону для дорожнього будівництва, що дозволяє позбутися необхідності імпортування бітуму, який використовується у якості в'язучого для асфальтобетону.

3. В Україні та світі є позитивний досвід використання бетонів на основі вторинних заповнювачів. Таких бетонів характеризуються відносно зниженими показниками міцності, проте вони можуть бути використані в тому числі у якості шарів основи дорожнього одягу та для не несучих конструкцій.

4. На сьогоднішній день розроблено технології демонтажу будівель та споруд або окремих їх конструкцій з можливістю вилучення якісних вторинних заповнювачів.

5. Широкий вибір асортименту вторинних заповнювачів та їх фракцій і наявність великої кількості доступної сировини робить дослідження в сфері використання вторинних заповнювачів для виготовлення бетонів актуальними та перспективними.

6. Масове використання бетону на основі вторинних заповнювачів можливо в конструкціях, до яких не висувається високих вимог щодо міцності та морозостійкості, зокрема у основах дорожнього одягу.

7. На основі проаналізованих літературних джерел сформульовані робоча гіпотеза досліджень та мета дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ І ХАРАКТЕРИСТИКА ВИКОРИСТАНИХ МАТЕРІАЛІВ

2.1 Схема проведення досліджень

Дослідження властивостей та пошук раціональних складів бетонів на вторинних заповнювачах для основ жорсткого дорожнього одягу проводилися у декілька пов'язаних між собою етапів, результати кожного з яких враховувалися на наступному.

На першому етапі було проведено аналіз технологічних рішень демонтажу будівель та споруд або їх окремих конструкцій з подальшим сортуванням та переробкою будівельних відходів. Порівнювалися методи демонтажу конструкцій різних типів для визначення найраціональнішого підходу для отримання будівельних відходів найбільш придатних для подальшої переробки у вторинні бетонні заповнювачі. Проведено оцінку життєвого циклу будівель для оцінки раціональності використання продуктів їх демонтажу для подальшого виробництва бетонів.

На другому етапі роботи було досліджено склади бетонів для дорожнього будівництва на основі вторинних заповнювачів та порівняно ефективність застосування пластифікаторів різного типу. Було порівняно властивості бетону на вторинному щебені з властивостями бетону аналогічного складу на гранітному щебені. Крім того змінювався тип кварцового піску: порівнювалися властивості бетонів на більш крупному піску з модулем крупності 2,29 і більш дрібному з модулем крупності 1,56.

На третьому етапі досліджень було порівняно властивості бетонів з різними типами крупного заповнювача: гранітного річкового гравію, вторинного щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки. Також використовувалося три типу пісків:

кварцовий, вторинний пісок з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинний пісок з переробленої цегляної кладки.

На четвертому етапі роботи були проведені дослідження властивостей бетонів і фібробетонів на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом. Порівняно властивості бетонів з вторинним щебенем із залізобетонних конструкцій та вторинним щебенем з неоднорідним складом. Досліджено властивості фібробетонів з поліпропіленовою фіброю на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом. Досліджено властивості бетонів і фібробетонів з різними типами фібрами (полімерної та скляної) на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементі з високим вмістом шлаку.

2.2 Методика досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів основ дорожнього одягу

При виготовленні бетонних сумішей всіх типів перемішування проводилося в лабораторному змішувачі примусового типу. Рухомість всіх сумішей визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-114-2002 «Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань» [119]. Дослідження властивостей і структури бетону проводились на зразках кубах розміром 100×100×100 мм та балках (призмах) розміром 100×100×400 мм, виготовлених згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [120]. Після розпалубки твердіння зразків відбувалося в нормальних умовах при температурі $20 \pm 2^\circ\text{C}$ і вологості $95 \pm 5\%$ в спеціальній шафі (камері нормального зберігання).

При виготовленні бетонів дозування цементу, щебеню і піску всіх типів та наявності фібри проводилося за масою. Дозування води і добавки проводилося за об'ємом з врахуванням середньої густини добавок.

Проводилися наступні дослідження властивостей бетонів та складових бетонних сумішей з використанням зазначеного обладнання.

Визначення середньої густини бетону. Випробовування проводились відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи

визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» [121]. Розміри зразків визначалися штанген-циркулем, маса зразків вагами Radwag PS 1000.R2 з ціною поділки 0,01 г та максимальним завантаженням в 3000 г.

Визначення водопоглинання зразків бетону проводилось відповідно до ДСТУ Б В.2.7-170:2008 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності» [121]. Висушування зразків виконувалось впродовж доби за температури 102 °С в сушильній шафі ВUKOTHERM ВК-50 (рис.2.1).



Рис. 2.1 Сушильна шафа ВUKOTHERM ВК-50

Випробування бетону на міцність на стиск проводилось на зразках із розмірами 100×100×100 мм у віці 3-х та 28-ми діб на пресі Controls МСС8 150/600/1000 kN із попереднім визначенням їх розмірів та середньої густини (рис.2.2). Обладнання проходить щорічну перевірку точності. Випробування проводилось згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками» [120].



Рис. 2.2 Прес Controls MCC8 150/600/1000 kN

Випробування бетону на міцність на розтяг при згині проводилось на зразках балках із розмірами $100 \times 100 \times 400$ мм у стандартному віці 28 діб на пресі VEB WERKSTOFFPRUFMASCHINEN LEIPZIG 280 із попереднім визначенням їх розмірів та середньої густини (рис.2.3). Обладнання проходить щорічну повірку точності. Випробування проводилось згідно ДСТУ Б В.2.7-214:2009 [120].



Рис. 2.3 Прес VEB WERKSTOFFPRUFMASCHINEN LEIPZIG 280

Визначення морозостійкості бетону проводилось згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 [122] за третім прискореним методом в 5 % розчині натрію хлориду при температурі заморожування $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ і відтаювання $+20\text{ }^{\circ}\text{C}$ в кліматичній камері BINDER Model MKF 720 (рис.2.4). Зразки попередньо пройшли процес водонасичення в 5 % розчині натрію хлориду протягом 5 діб. Марка за морозостійкістю визначалася згідно ДСТУ Б В.2.7-47-96 [123].



Рис. 2.4 Кліматична камера BINDER Model MKF 720

Для *визначення ударостійкості бетону* в ході дослідження бетонів на основі вторинних заповнювачів для основ дорожнього покриття зі складів бетонів третього і п'ятого етапів роботи було виготовлено зразки розмірами $100\times 100\times 40$ мм. Дослідження проходило на спеціально виготовленому пристрої для випробувань бетону на стійкість до дії удару. Пристрій представляє собою направляючу трубу з лінійною шкалою, в середині якої з заданої висоти під дією сили тяжіння падає гиря масою 2 кг на встановлений зразок бетону (рис. 2.5). Досліджуваний зразок бетону встановлюється під направляючою трубою в ящик з піщаною подушкою.



Рис. 2.5 Пристрій для випробування ударостійкості бетону

Конструкція пристрою та методика випробування були розроблені відповідно до досліджень [124] та рекомендаціям [125]. Під час досліджень гиря падала на зразок бетону спочатку з висоти 1 см один раз, далі з висоти 2 см два рази, з висоти 3 см три рази і так далі. Для концентрації удару контакт гирі зі зразком відбувався через подбавок – сталевий шарик радіусом 1 см. Подбавок встановлювався по центру зразка. Скидання гирі з висоти відбувалось до моменту розколювання зразку бетону. Показник стійкості бетону до удару характеризувалася загальною роботою, витраченою на руйнування зразка віднесеної до площі, через яку передавалося навантаження, та обчислювалася за формулою 2.1 та вимірюється в Дж/см² [125]:

$$T = \frac{P \times \sum_1^N h \times N}{S} \quad (2.1),$$

де

P – маса гирі, (кг);

h – висота падаючого вантажу, (м);

N – кількість ударів, що передують руйнуванню.

S – площа, через яку передавалося навантаження (см^2).

Визначення зернового складу та модулю крупності дрібного заповнювача виконувалось згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 «Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань» [126]. Висушений до постійної маси пісок було просіяно крізь сита з розмірами отворів 10 мм та 5 мм. З піску, що пройшов крізь дані сита було відібрано пробу масою 1000 г. Пробу було просіяно крізь набір сит з розмірами отворів 2,5 мм, 1,25 мм, 0,63 мм, 0,315 мм та 0,16. За результатами просіювання визначено часткові та повні залишки на кожному ситі та модуль крупності піску.

Міцність крупного заповнювачу за дробимістю визначалася за ДСТУ Б В.2.7-71-98 «Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань» [127] ступенем руйнування зерен при стисканні в циліндрі. Для кожного типу заповнювача відбиралося дві проби по 4 кг висушеного до постійної маси крупного заповнювачу. Пробу було засипано до циліндру з висоти 50 мм так щоб верхній рівень матеріалу на 15 мм не доходив до верхньої частини циліндру. Потім в циліндр було встановлено плунжер та перевірено щоб плита плунжеру була на рівні верхньої частини циліндру. Після цього циліндр з наповненням було розміщено на нижню плиту пресу, навантаження подавалось зі швидкістю 1-2 кН в секунду та максимально доводилось до 50 кН. Далі вміст циліндру було зважено (m) та розсіяно на ситі з розміром отворів 2,5 мм, а маса залишку на ситі зважується. Дробимість щебеню D_p , %, визначалася з точністю до 1 % за формулою 2.2:

$$D_p = \frac{m - m_1}{m} 100 \quad (2.2),$$

де

m – маса аналітичної проби щебеню (гравію), г;

m_1 – маса залишку на контрольному ситі після просіювання роздробленої в циліндрі проби щебеню (гравію), г.

За результат приймалося середнє арифметичне значення двох паралельних випробувань.

Насипна густина крупного заповнювачу визначалась за ДСТУ Б В.2.7-71-98 «Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань» [127]. Щебінь, висушений до постійної маси, насипався з висоти 10 см до попередньо зваженого циліндру з відомим об'ємом до утворення конусу, який знімався лінійкою. Потім за формулою 2.3 визначалась насипна густина з точністю до 10 кг/м³.

$$\rho_H = \frac{m_1 - m}{V} \quad (2.3),$$

де

m – маса мірного циліндру, кг;

m_1 – маса мірного циліндру зі щебенем, кг;

V – об'єм мірного циліндру, м³.

Водопоглинання крупного заповнювачу визначалась за ДСТУ Б В.2.7-71-98 «Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань» [127]. Відібрана проба щебеню масою 500 г була розміщена в судині та заповнена водою так щоб рівень води був вище рівня щебеню не менш ніж на 20 мм. Щебінь витримувався у воді 48 годин, після виймався з води, надлишкова рідина прибиралась вологою тканиною, після щебінь зважувався. Після зважування щебінь було поміщено до сушильної шафи на 24 години за температури 102 °С, а після зважено. Водопоглинання крупного заповнювачу визначалось за формулою 2.4:

$$W_{\text{погл}} = \frac{m_1 - m}{m} 100 \quad (2.4),$$

де

m – маса зразка або проби в сухому стані, г;

m_1 – маса зразка або проби в насиченому водою стані.

2.3 Характеристика використаних матеріалів

В іноземній англомовеній літературі вторинні заповнювачі для бетону, виготовлені з продуктів демонтажу будівель та споруд (з залізобетонних конструкцій, цегляної кладки, керамічних матеріалів та іншого) зустрічаються під назвою «secondary concrete aggregates» та «recycled concrete aggregates», що перекладається як вторинні заповнювачі бетону та перероблені заповнювачі бетону. У зв'язку з тим, що в україномовній науковій літературі частіше зустрічається термін «вторинні заповнювачі бетону», у даній дисертаційній роботі використовувався саме такий термін для позначення сировинного матеріалу. Також в роботі використано назви «вторинний щебінь» та «вторинний пісок», які означають вторинні заповнювачі бетону крупної та дрібної фракції відповідно.

Для виготовлення експериментальних бетонів в ході другого етапу роботи було використано два види цементу виробництва CRH AT «Подільський цемент»:

- шлакопортландцемент ССШПЦ 400-Д60. Вміст меленого доменного шлаку до 60 %;

- портландцемент ПЦ П/Б-Ш-400. Вміст меленого доменного шлаку до 35%.

Також на другому етапі роботи використано три види хімічних добавок:

- добавка суперпластифікатор СП-1 (С-3), ТУ 5745-001-97474489-2007 (ТУ 5870-005-58042865-05), виробництва ТОВ Поліпласт, м. Новомосковськ;

- добавка пластифікатор лігносульфанат, виробництва ТОВ Доронік-Україна, м. Свалява;

- добавка суперпластифікатор полікарбоксілатного типу MC-PowerFlow 3200, виробництва ТОВ МЦ Баухемі, м. Березань, Київська обл.

У якості заповнювачів для бетону на другому етапі роботи використовувалися наступні матеріали:

- вторинний щебінь фракції 5-20 мм. Марка щебеню за дробимістю 600. Насипна густина вторинного щебеню $\rho_n = 1310 \text{ кг/м}^3$;

– гранітний щебінь фракції 5-20 мм. Марка щебеню за дробимістю 1200. Насипна густина гранітного щебеню $\rho_n = 1390 \text{ кг/м}^3$;

– кварцовий пісок Біляєвського кар'єру (Одеська область) з модулем крупності 1,56. Насипна густина піску $\rho_n = 1420 \text{ кг/м}^3$.

– кварцовий пісок Микитівського кар'єру (Миколаївська область) з модулем крупності 2,29. Насипна густина піску $\rho_n = 1490 \text{ кг/м}^3$. Ці два види кварцового піску використовувалися як найбільш розповсюджені типи дрібного заповнювача для бетонів на півдні України.

Для виготовлення бетонів в ході третього етапу досліджень використовувалося два типи цементу:

- портландцемент СЕМ II/B-S 32.5 R виробництва Словацької компанії Cementaren Ladce, марка 400. Він містить до 35 % доменного шлаку;

- портландцемент СЕМ II/B-S 42.5 N виробництва Словацької компанії Cementaren Ladce, марка 500. Він містить 21 % доменного шлаку.

Також на третьому етапі досліджень були використані такі добавки:

- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Soudal Soudaplast виробництва чеської фірми Soudal. Кількість добавки у бетонній суміші становила 1 % від маси цементу;

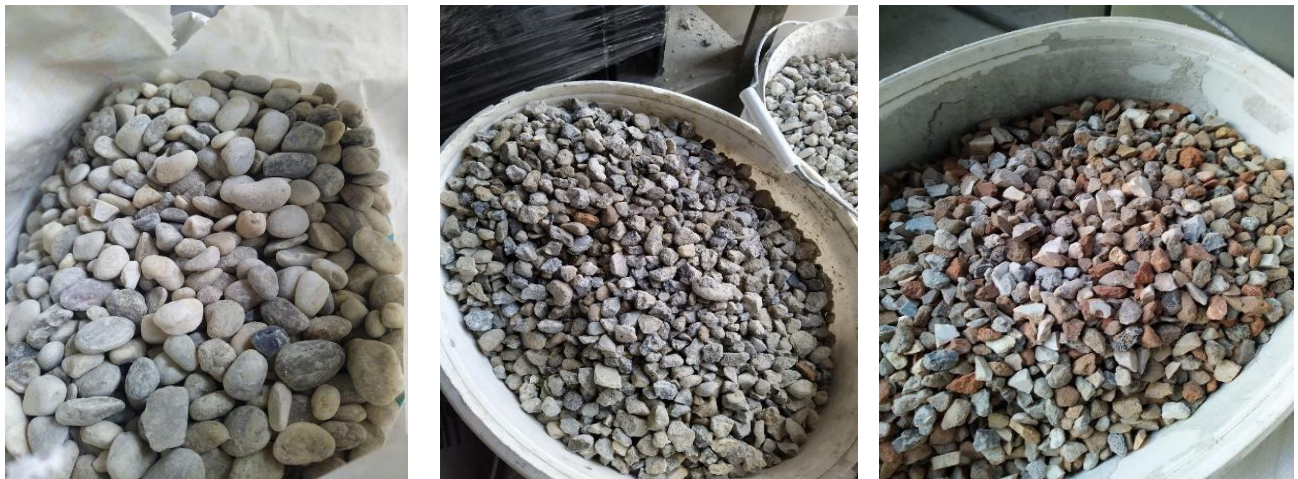
- суперпластифікатор полікарбоксилатного типу Verament NT28 виробництва словацької фірми Beton Racio. Кількість добавки у бетонній суміші становила 1,2 % від маси цементу. Виробник зазначає, що добавка Verament NT28 ефективна для підвищення здатності бетону до самоущільнюваності, що особливо важливо при роботі з бетонами малорухливими, саме які і використовувалися в рамках даних дослідження (ОК = 1-2 см).

Для виготовлення бетонів в ході експериментальних досліджень третього етапу використовувалися наступні види крупного заповнювача фракції 8-16 мм:

- гранітний річковий гравій, добутий у словацькій частині річки Дунай. Насипна густина гравію $\rho_n = 1570 \text{ кг/м}^3$, водопоглинання 0,70 %, дробимість 1 % (рис. 2.6.a);

- вторинний щебінь з перероблених залізобетонних конструкцій. Насипна густина щебеню $\rho_n = 1260 \text{ кг/м}^3$, водопоглинання 5,94 %, дробимість 1 % (рис. 2.6.б);

- вторинний щебінь з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки. Насипна густина даного вторинного заповнювача $\rho_n = 1150 \text{ кг/м}^3$, водопоглинання 8,53 %, дробимість 3 % (рис. 2.6.в).



а

б

в

Рис. 2.6 Різновиди крупного заповнювача, використаного при виготовленні досліджених бетонів: а – гранітний річковий гравій, б – вторинний щебінь з перероблених залізобетонних конструкцій, в – вторинний щебінь з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки

Також для виготовлення бетонів використовувалось три види дрібного заповнювача (піску) фракції 0-4 мм:

– кварцовий пісок з модулем крупності 3,19 та насипною густиною $\rho_n = 1870 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.7.а);

– вторинний пісок з перероблених залізобетонних конструкцій з модулем крупності 3,53 та насипною густиною $\rho_n = 1500 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.7.б);

– вторинний пісок з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки. Модуль крупності даного піску 3,72, насипна густина $\rho_n = 1375 \text{ кг/м}^3$ (рис. 2.7.в).



а

б

в

Рис. 2.7 Різновиди дрібного заповнювачу (піску), використаного при виготовленні досліджених бетонів: а – кварцовий пісок, б – вторинний пісок з перероблених залізобетонних конструкцій, в – вторинний пісок з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки

Вторинні заповнювачі, які використовувалися на третьому етапі роботи, було надано фірмою «A-Z Stav», м. Братислава, Словаччина.

Зерновий склад пісків, які використовувалися в експерименті представлено в таблицях 2.1 – 2.3.

Таблиця 2.1

Зерновий склад кварцового піску з модулем крупності 3,19

Залишки на ситах	Розмір отворів сит, мм					Прохід скрізь сито 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
часткові, %	30,1	15,3	11,4	32,8	7,9	2,5
повні, %	30,1	45,4	56,8	89,6	97,5	

Таблиця 2.2

Зерновий склад вторинного піску з перероблених залізобетонних конструкцій з модулем крупності 3,53

Залишки на ситах	Розмір отворів сит, мм					Прохід скрізь сито 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
часткові, %	43,1	15,8	12,3	14,3	9,2	6,3
повні, %	43,1	58,9	71,2	85,5	94,7	

Таблиця 2.3

Зерновий склад вторинний пісок з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки з модулем крупності 3,72

Залишки на ситах	Розмір отворів сит, мм					Прохід скрізь сито 0,16
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	
часткові, %	49,5	14,9	7,8	16,8	7,5	4,5
повні, %	49,5	64,4	72,2	89	96,5	

В ході четвертого етапу дослідження, спрямованого на отримання бетонів на основі вторинних заповнювачів з поліпшеними певними властивостями, в першу чергу міцності на розтяг при згині, були виготовлені склади з дисперсним армуванням полімерною фіброю.

Використовувалася поліпропіленова фібра EGIBI PP 34 um/12 mm виробництва чеської фірми EGIBI з товщиною волокон 32 мкм (0,032 мм) і довжиною 12 мм (рис.2.8). Кількість фібри у бетонній суміші становила 900 г/м³.



Рис. 2.8 Поліпропіленова фібра EGIBI PP 34 $\mu\text{m}/12\text{ mm}$

Також на четвертому етапі дослідження визначалися властивості бетонів на основі вторинних заповнювачів з неоднорідним складом.

У якості крупного заповнювача для виготовлення бетонів на четвертому етапі роботи використовувався вторинний заповнювач фракції 8-16 мм з неоднорідним складом (рис.2.9). Насипна густина сировини $\rho_n = 1170\text{ кг/м}^3$, водопоглинання 13,03 %, дробимість склала 3 %. До складу даного крупного заповнювача входить: 35,8 % цементно-піщаного масиву бетону, 30,2 % граніту з'єднаного з цементно-піщаним масивом, 24,68 % чистого граніту, 9 % цегли та керамічної плитки, 0,8 % асфальтобетону, 0,4 % сталевий проволочки.



Рис. 2.9 Вторинний заповнювач фракції 8-16 мм з неоднорідним складом

Для виготовлення зазначених бетонів даного етапу досліджень використовувався портландцемент СЕМ II/B-S 42.5 N виробництва Словацької компанії Cementaren Ladce, марка 500. Він містить 21 % доменного шлаку.

Використовувався суперпластифікатор полікарбосилатного типу Verament NT28 виробництва словацької фірми Beton Racio. Кількість добавки у бетонній суміші становила 1,2 % від маси цементу.

В ході четвертого етапу досліджень для приготування бетонів і фібробетонів на основі вторинних заповнювачів з неоднорідним складом та цементу з підвищеним вмістом доменного шлаку було використано:

- цемент СЕМ III/A з вмістом шлаку доменних печей в розмірі 65 % виробництва CRH Cement Multicem, Німеччина.

- добавка суперпластифікатор полікарбосилатного типу Soudal Soudaplast виробництва чеської фірми Soudal (1,2 % від маси цементу);

- поліпропіленова фібра BeneSteel 55 (рис.2.10 а). Довжина волокон 55 мм, еквівалентний діаметр 0,48 мм, виробник SKLOCEMENT BENES, Чехія. Міцність на розрив відповідно EN 14889-2 610 МПа;

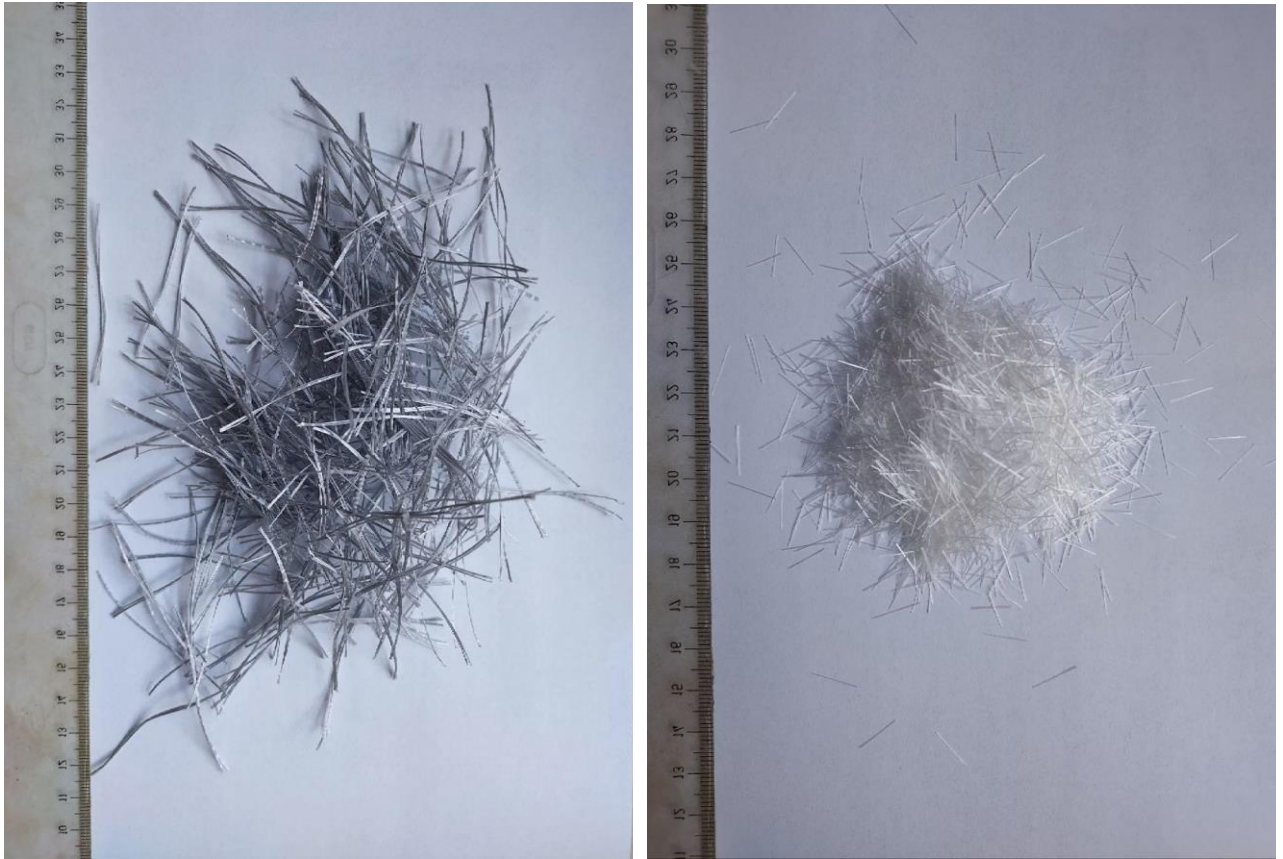
- фібра з лугостійкого скла ANTI-CRAK HP 12 (рис.2.10 б). Довжина волокон 12 мм, еквівалентний діаметр волокон 0,2-0,5 мм, виробник Owens Corning, США. Міцність на розрив 1000-1700 МПа.

Також для приготування бетонів і фібробетонів на основі вторинних заповнювачів з неоднорідним складом та цементу з підвищеним вмістом доменного шлаку були використані наступні види крупного заповнювача фракції 8-16 мм:

- гранітний річковий гравій, добутий при словацькій частині річки Дунай. Насипна густина гравію $\rho_n = 1570 \text{ кг/м}^3$, водопоглинання 0,70 %;

- вторинний заповнювач з неоднорідним складом. Насипна густина $\rho_n = 1170 \text{ кг/м}^3$, водопоглинання 13,03 %. Аналіз складу даного заповнювачу представлено вище.

Використовувались наступні види дрібного заповнювачу (піску) фракції 0-4 мм:



а

б

Рис. 2.10 Поліпропіленова фібра VeneSteel 0,8/55 мм (а) та скляна фібра ANTI-CRAK HP 12 (б)

– кварцовий пісок з модулем крупності 3,19 та насипною густиною $\rho_n=1935$ кг/м³;

– вторинний пісок з перероблених залізобетонних конструкцій з модулем крупності 3,83 та насипною густиною $\rho_n=1500$ кг/м³.

Склади всіх досліджених бетонів на всіх типах заповнювача наведені у відповідних підрозділах третього і четвертого розділів дисертації.

Висновки за 2-м розділом

1. Описано загальну схему і послідовність проведення досліджень.
2. Описані застосовані методи досліджень фізико-механічних властивостей і структури бетонів основ дорожнього одягу, а також характеристик бетонних сумішей і заповнювачів.
3. Наведені основні характеристики використаних для приготування бетонів матеріалів: цементів (ПЦ II/Б-Ш-400, ССШПЦ 400-Д60, СЕМ II/В-S 32.5 R, СЕМ II/В-S 42.5 N, СЕМ III/A), суперпластифікаторів (СП-1 (С-3), МС-PowerFlow 3200, Soudal Soudaplast, Beton Racio Berament НТ28), гранітного щебеню, гранітного річкового гравію, кварцового піску різних кар'єрів, крупних і дрібни вторинних заповнювачів різних типів, полімерної та скляної фібри різних типів.
4. Прийняті методи проведення досліджень бетонів на вторинних заповнювачах для основ жорсткого дорожнього одягу дозволяють вирішити поставлені в роботі завдання та досягнути мети дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 3
ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНІВ
НА ВТОРИННИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ
ДЛЯ ОСНОВ ЖОРСТКОГО ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

3.1 Оцінка позитивного впливу на навколишнє середовище використання продуктів демонтажу в рамках життєвого циклу будівель та споруд

Життєвий цикл будівель і споруд – це період протягом якого виконуються інженерна розробка, проектування, будівництво, експлуатація та ремонти, модернізація та демонтаж. Для найбільш повної та детальної оцінки життєвого циклу будівлі або споруди слід враховувати цикл видобутку сировини і виготовлення матеріалів для будівництва. Також в життєвому циклі необхідно враховувати переробку та повторне використання бетонного лому та інших будівельних відходів від демонтажу, а також будівництво із отриманих матеріалів нових будівель і споруд, зокрема автомобільних доріг. Таким чином, відповідно до EN 15804:2012 + A2:2019 + AC:2021 [128] повний життєвий цикл будівель і споруд можна побудувати у табличному вигляді (таблиця 3.1). Можливість капітальних ремонтів та модернізації будівель і споруд не розглядалась.

Таблиця 3.1

Життєвий цикл будівель і споруд

<i>Цикл</i>	<i>Назва циклу</i>	<i>Назва етапу</i>
A1	Видобуток сировини	Етап виготовлення матеріалу
A2	Транспортування сировини	
A3	Виготовлення будівельного матеріалу	
A4	Транспортування матеріалу	Етап будівництва

<i>Цикл</i>	<i>Назва циклу</i>	<i>Назва етапу</i>
A5	Будівництва	
B1	Експлуатація	Етап експлуатації
C1	Демонтаж	Етап демонтажу
C2	Транспортування продуктів демонтажу	
C3	Обробка сміття	
D1	Потенційне вторинне використання	Етап вторинного використання

Важливою фазою аналізу життєвого циклу будівель та споруд є оцінка різних індикаторів впливу на навколишнє середовище на кожному з циклів – Global Warming Potential (Потенціал впливу на глобальне потепління), Ozone Depletion Potential (Потенціал руйнування озонового шару), Acidification Potential (Потенціал підкислення дощових хмар), Eutrophication potential (Потенціал евтрофікації – збагачення водойм біогенними забрудниками) та інші (таблиця 3.2).

Таблиця 3.2

Вплив на навколишнє середовище 1 м³ бетону для кожного циклу будівлі [129]

Індикатор впливу	Цикл				
	A1-A3	A4-A5	B1	C1-C3	D1
Потенціал впливу на глобальне потепління (kg CO ₂)	150,4	13,08	-3,25	22,02	-9,67
Потенціал евтрофікації (mol N eqv.)	1,04	0,34	0	0,86	-0,09
Потенціал руйнування озонового шару (kg CFC 11 eqv.)	1E-10	5.473E-12	0	6.345E-15	-1E-10
Потенціал підкислення дощових хмар (mol H ⁺ eqv.)	0,28	0,07	0	0,16	-0,02

Оцінка виконується на одиницю виміру будівельного матеріалу відповідно. В рамках чинного дослідження оцінка виконувалась на 1 м³ бетону класу C25/30 через його подібність до середнього класу по міцності до бетонів, які найбільш масово використовуються для отримання вторинних заповнювачів. Дані впливу матеріалу на навколишнє середовище взяті із реєстру Федеральне міністерство житлового будівництва, міського розвитку та будівництва Німеччини (Bundesministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen) [129] та розміщені у табличному вигляді. Дані отримані на основі комплексного дослідження міністерства.

Оцінка впливу була врахована на основі необхідності в ресурсах для виготовлення 1 м³ бетону для кожного життєвого циклу будівлі або споруди, що відображено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3

Необхідність в ресурсах для 1 м³ бетону по циклах

Вид ресурсу	Цикл				
	A1-A3	A4-A5	B1	C1-C3	D1
Використання електроенергії, (кВт/год)	262,4	34,6	0	94,5	-53,9
Використання вторинних матеріалів (кг)	9	0,5	0	0	2344
Використання палива (МДж)	418,8	21,6	0	0	0
Використання води (кг)	0,7	230	0	0,1	0,1
Необхідність в утилізації відходів (кг)	17	0,9	0	0,5	22,9

З даних таблиць стає зрозуміло, що цикл D1 життєвого циклу будівель та споруд, а саме вторинне використання продуктів демонтажу, має позитивне відображення на кожен з індикаторів впливу на навколишнє середовище. Таким

чином, відповідно до даних досліджень [129] використання вторинних заповнювачів здатне знизити викиди CO₂, сповільнити руйнування озонового шару, зменшити забруднення навколишнього середовища нітратами та біогенними речовинами, що викликає цвітіння води та заболочуваність водойм і підкислення дощових хмар та утворення кислотних дощів. Враховуючи великі об'єми сировини, які необхідні для дорожнього будівництва, використання вторинних заповнювачів робить зниження негативного впливу на навколишнє середовище за кожним з індикаторів суттєвішим [110, 111].

Проаналізувавши таблицю 3.2 можна зробити висновок, що реконструкція будівлі або споруди завдала би меншого впливу на навколишнє середовище, проте варто врахувати ситуації, коли реконструкція неможлива. До будівель та споруд, які неможливо реконструювати відносяться, в тому числі ті, які постраждали в наслідок бойових дій. Таким чином на даний момент в Україні є дуже велика кількість завчасно демонтованих будівель, через руйнацію, що призвело до колосального негативного впливу на природу. Шляхом до компенсації цього негативного впливу, принаймні часткового, є використання вторинних заповнювачів бетону, отриманих з продуктів цих руйнувань, для виготовлення нового бетону та інших будівельних матеріалів.

Беручи до уваги позитивний вплив на зниження забруднення навколишнього середовища, на додачу до аспектів, вказаних в розділах вище, можна зробити висновок, що використання вторинних бетонних заповнювачів має комплексне позитивне значення сталого розвитку.

3.2 Аналіз технологій ефективного видобутку вторинних заповнювачів з відходів демонтажу будівель

В якості першого етапу дисертаційного дослідження було проведено аналіз технологічних рішень демонтажу, сортування та подальшої переробки відходів у вторинні заповнювачі для виявлення можливості отримання однорідної та максимально якісної сировини. Враховуючи високу вартість демонтажу будівель

і споруд, є необхідним проведення грамотного знесення для ефективного повторного використання отриманої сировини і автоматичного вирішення проблеми утилізації відходів. На сьогоднішній день існує багато технологій знесення будівель і споруд, які доречно застосовувати. Грамотний підхід до вибору технології знесення дозволить максимально здешевити процес, розсортувати сировину і, як наслідок, отримати з відходів будівельні матеріали більш високої якості.

Аналіз показників утилізації відходів та використання їх як вторинної сировини свідчить про економічну привабливість даного напрямку. Так, за даними статистичної звітності по 53 видах ресурсноцінних будівельних відходів, обсяг їх використання може становити 58,5 % від загального обсягу цих відходів. Будівельне сміття містить велику кількість металевого та бетонного брухту. У деяких випадках заміна природних ресурсів будівельним сміттям може заощадити до 50 % матеріалу [130].

Переробка сміття, в тому числі відходів будівництва та зносу, є перспективним бізнесом, оскільки вартість переробленого щебеню є меншою в порівнянні з природним. Наприклад у країнах Європейського союзу вона становить 30-35 євро за тонну [131]. Вторинний щебінь із бетонних конструкцій будівель і споруд, що зносяться, дешевше завдяки тому, що енерговитрати на його виробництво у 8 разів менші. При цьому собівартість бетону з ним знижується на 25 % [74]. Крім того, відсутність певних стандартів може дозволити виробникам вторинних нерудних будматеріалів використовувати практично всі отриманні продукти. Але, наприклад, потрапляння гіпсу, що міститься в оздоблювальних матеріалах і перегородках, може призвести до значної корозії нового бетону, аж до його руйнування [74]. Для отримання якісного продукту необхідно суворо дотримуватися технології знесення будівель, сортування матеріалів, підготовки відходів до переробки. Тому для широкого впровадження переробки будівельних відходів особливо важливо вибрати правильну технологію знесення конструкцій, яка дозволить отримати найбільш однорідний матеріал без домішок [132].

Основними компонентами залізобетону є щебінь, пісок, цемент і металева арматура. Ці матеріали відносно стабільні в навколишньому середовищі – їх загальний об'єм і вага мало змінюються навіть після тривалого використання. Після подрібнення і відділення металу отримані вторинні заповнювачі в порівнянні з природними мають меншу середню густину, більш високе водопоглинання та втрату маси при випробуванні на стійкість до атмосферних впливів і меншу стійкість до стирання. Всі ці зміни пов'язані з наявністю в бетонному брухті розчинової складової (цементно-піщаної матриці). Велике значення для прогнозування поведінки заповнювача в сумішах і затверділому бетоні має кількісний вміст компонентів у різних фракціях бетонного брухту. Знання закономірностей зміни його компонентного складу дозволяє оптимізувати використання різних фракцій.

Сьогодні існує багато методів демонтажу будівельних конструкцій: статичних (розколювання, роздрібнення, різання та розширення) та динамічних (ударний, вібраційний, вибуховий). В даний час найбільших результатів досягнуто в удосконаленні технології руйнування будівельних конструкцій ударними методами, розколюванням, різанням, дробленням і розширенням. Але, разом з тим, кожен із способів має обмеження щодо використання, або навпаки, рекомендації щодо застосування для руйнування будівель і споруд з певного матеріалу. У зв'язку з цим актуальним залишається питання їх класифікації. Серед найбільш розповсюджених можна виділити наступні методи [77]:

Ударний метод. Найбільшого поширення набули гідравлічні та пневматичні молоти на самохідних агрегатах, які характеризуються високою продуктивністю, мобільністю та можливістю точного прикладання удару. У порівнянні з пневматичними молотами, гідравлічні виділяють менше шуму, вібрації та утворення пилу. Найкраще зарекомендували себе гідравлічні молоти з енергією одноразового удару 9000 Дж і гідропневматичні установки з навантаженням до 3000 Дж. Пневматичні молоти з енергією удару 80-90 Дж застосовуються для демонтажу бетонних і залізобетонних конструкцій і буту, бутобетону, цегляних конструкцій та напівскельних порід. Для розбирання та

руйнування різного роду конструкцій вони забезпечені змінними робочими органами (списом та лопатою). Пневматичні відбійні молотки з енергією удару 30-45 Дж застосовуються для руйнування бетонних і асфальтобетонних покриттів, цегляних стін. Для забезпечення енергією ручних пневматичних молотів використовуються стаціонарні або переносні компресорні установки. Електричні ручні ударні машини мають меншу енергію одиничного удару порівняно з пневматичними, однак під час їх роботи виділяється значно нижчий рівень шуму, що призводить до зниження стомлюваності працівників.

Електричні ручні молотки доцільно застосовувати для поелементного розбирання конструкцій середньої та малої міцності, а також при роботах на висоті. Пневматичні ручні ударні машини ефективно застосовуються для демонтажу більш міцних бетонних, залізобетонних і цегляних конструкцій.

Метод розколювання. При руйнуванні бетонних і залізобетонних конструкцій розколюванням застосовуються гідравлічні клини, які дозволяють працювати без шкідливого впливу вібрації, шуму і пилоутворення. Гідравлічний клин складається з гідроциліндра і підпірного пристрою, що вставляється в свердловину і створює зусилля до 130 тон, а також насосної станції, яка створює тиск у гідроциліндрі.

Для розбивання бетонних фундаментів застосовуються установки, що складаються з масляної насосної станції і декількох (до 5) клинових пристроїв. Для розділення частин бетону в ньому висвердлюють отвори з кроком, що залежить від міцності бетону і становить 400-800 мм. Діаметр отворів повинен бути на 3-5 мм більше діаметра робочого органу. Клиновий пристрій вводиться в отвір, потім масло під тиском потрапляє в гідроциліндр. Відколювання шматків бетону відбувається без розльоту осколків, що супроводжується слабким тріском. Продуктивність установки 0,25-0,5 м³/год.

Метод різання. При демонтажі конструкцій застосовують методи розрізання, які дають можливість розчленувати конструкцію на окремі елементи (блоки), придатні для повторного використання. У цьому випадку використовуються алмазні відрізні круги і термічна різка кисневим дуттям,

плазмою або електричною дугою. Сучасні верстати з алмазними кругами дозволяють різати залізобетон на глибину до 400 мм з механічною швидкістю подачі до 2 м/хв.

Метод роздрібнення. Дроблення здійснюється за допомогою зубів, які встановлюються на бетоноломі або окремо монтується на екскаваторі. Змінне робоче обладнання дозволяє дробити залізобетонні конструкції товщиною до 700 мм і фундаменти товщиною до 1200 мм. Однією з головних переваг дробильної установки є можливість використовувати її безпосередньо на місці утворення відходів будівництва та знесення. У цьому випадку мобільний дробильно-сортувальний комплекс доставляється на будівельний майданчик, де відразу приступає до роботи.

Метод руйнування розширювальними композиціями. Для руйнування будівельних конструкцій за допомогою розширення найчастіше використовують патрони рідкого вуглекислого газу (кардоксу), дія яких базується на збільшенні об'єму в результаті переходу вуглекислого газу з рідкого стану в газоподібний, при цьому тиск змінюється від 125 до 275 МПа. Останнім часом з'явилися й інші розширювальні сполуки, дія яких заснована на різних хімічних процесах, що тривають від кількох годин до 30 хвилин. Також руйнування конструкцій можливе в результаті розширення суміші порошку і води, залитої в просвердлені отвори, але при цьому тиск значно нижче, ніж при використанні патронів з кардоксом (в межах 30-40 МПа). Тому за допомогою цього, як правило, руйнуються легкі залізобетонні конструкції.

Електрогідравлічний метод руйнування конструкцій. Проводиться без утворення вибухової хвилі та розльоту осколків, що є основоположним фактором при виконанні робіт у місцях з виділенням пилу або ймовірною появою газу. Цей спосіб абсолютно безпечний для людей, які працюють поблизу і встановленого обладнання, тому його можна застосовувати не тільки на відкритих будівельних майданчиках, але і всередині промислових приміщень. Застосування установки електрогідравлічного впливу для руйнування кам'яних і бетонних масивів, бутобетону і цегляної кладки дозволяє в десятки разів

підвищити продуктивність праці та навіть повністю виключити використання фізичної людської праці на цих роботах.

Буровибуховий метод руйнування. У цьому методі використовується енергія вибуху. Цей спосіб давно використовується для демонтажу будівель, тому вважається одним з перших. Для зменшення розльоту частин використовують локалізатори вибуху різної конструкції. Їх перевагами перед іншими засобами є відсутність уламків і шуму, велика кількість одночасно заповнених свердловин, які за добу викликають розтріскування необмежених за обсягом масивів. Руйнування бетонних блоків марки 300 і більше, а також щільноармованих блоків проводиться з попереднім бурінням вертикальних або похилих шпурів. Недоліками вибухового методу є великий розліт осколків, значний шум (до 108 дБ в радіусі 50 м) і виділення отруйних газів.

Було проведено аналітичний порівняльний експеримент [77] усіх методів знесення конструкцій для встановлення відповідності між будівельними конструкціями та технологією демонтажу з метою отримання найбільш ефективного способу вилучення сировини. Встановлено, що чітко передбачити регламент вибору технології руйнування неможливо. Це пов'язано з тим, що навіть найменші зміни в конструктивних особливостях або навколишньому середовищі можуть змінити ефективність використання технології знесення в порівнянні з іншими подібними конструкціями. Однак для всіх будівель і споруд, для максимально ефективного вилучення якісної сировини з відходів демонтажу, важливо проводити поетапний знос конструкцій і покриттів з різних матеріалів. Особливо важливо відокремити матеріали, які згодом можуть викликати корозію бетону, виготовленого з отриманої сировини.

Для найбільш ефективного та раціонального використання наявних знань про знесення будівель, споруд та їх окремих конструкцій і, як наслідок, отримання найбільшої економічної вигоди, було проведено класифікацію технологій демонтажу, їх опис та рекомендації щодо використання в табличному вигляді (Таблиця 3.4) [77].

Таблиця 3.4

Рекомендації щодо вибору технології демонтажу

Назва технології	Необхідне обладнання	Рекомендації для використання
<i>Ударний метод</i>	Молотки самохідні гідравлічні та пневматичні, молотки ручні	Для знесення бетонних і залізобетонних конструкцій, бутобетонних і цегляних конструкцій, напівскельних і асвальтових покриттів
<i>Метод розколювання</i>	Гідравлічні клини	Використовується в ситуаціях, коли неприпустимий шкідливий вплив вібрації, шуму та утворення пилу
<i>Метод різання</i>	Пили з алмазними відрізними дисками, термічними різальними пристроями з використанням кисневого дуття, плазми або електричної дуги	При необхідності розчленувати конструкцію на окремі елементи, придатні для повторного використання
<i>Метод роздрібнення</i>	Зуби, що встановлюються на бетоноломах або окремо монтуються на екскаваторі	Використовується при необхідності подрібнення і переробки бетонного брухту безпосередньо на місці утворення
<i>Метод руйнування розширювальними композиціями</i>	Картриджі рідкого вуглекислого газу (кардокс)	Для руйнування легких залізобетонних конструкцій
<i>Електрогідравлічний метод руйнування конструкцій</i>	Установка електрогідравлічного ефекту	Може застосовуватися всередині виробничих приміщень, де неприпустимо застосування вибухової хвилі та розліт осколків, пило- та газовиділення. Спосіб безпечний для людей, які працюють поблизу та встановленого обладнання

Продовження таблиці 3.4

Назва технології	Необхідне обладнання	Рекомендації для використання
<i>Буровибуховий метод</i>	Початковий імпульс вибухової речовини (заряди свердловини та маскувальний вибух)	Спосіб ефективний для швидкого знесення великого обсягу конструкцій

Ефективний демонтаж будівель і споруд дозволяє вирішити низку завдань, а саме: ліквідувати звалища та захоронення відходів будівництва та демонтажу; створити і вдосконалити ресурсозберігаючі технології переробки відходів будівництва та зносу, що дозволяють економити будівельні матеріали; знизити вартість будівельних конструкцій, економити природні ресурси. Для найбільш ефективного вилучення корисних ресурсів з відходів будівництва та демонтажу важливо правильно вибрати технологію або комплекс технологій для зносу конструкцій. При виборі методів розбирання і руйнування конструкцій одним з основних показників є трудомісткість і терміни виконання робіт. Однак ефективність використання того чи іншого методу істотно залежить і від виходу матеріалів, готових до повторного використання. Таким чином, при грамотний підбір технологій знесення будівель і споруд та їх окремих частин дає можливість отримання достатньо чистих та однорідних вторинних заповнювачів з продуктів демонтажу. Найбільш масовими готовими до використання вторинними заповнювачами, що можуть використовуватися для виробництва бетону, є: вторинний щебінь з залізобетонних (бетонних) конструкцій, вторинний щебінь з цегляної кладки, змішаний вторинний щебінь, вторинний пісок з залізобетонних конструкцій, вторинний пісок з цегляної кладки. Саме такі види вторинних заповнювачів використовувалися в подальших етапах роботи.

3.3 Дослідження ефективності застосування пластифікаторів різного типу в бетонах на вторинному щебені та різних видах піску

Беручи до уваги, що при виготовленні бетону, на його якість впливає низка факторів [133], таких як тип та якість крупного та дрібного заповнювача, його ширахуватість та пилюватість, вміст глинистих частинок, водопоглинання матеріалів, дуже важливу роль при структуроутворенні відіграють хімічні добавки, насамперед пластифікатори. Заміна піску або щебеню на сировину виробництва іншого кар'єру може відчутно змінює структуру і властивості бетону. При заміні природних заповнювачів бетону на вторинні, які мають відмінні характеристики, якість та властивості бетону змінюється ще більше. Виникає необхідність проведення досліджень та визначення оптимальних складів та співвідношення сировини у складі таких бетонів. Ситуація ускладнюється великим різноманіттям вторинної сировини, утвореної шляхом демонтажу будівель та споруд, її неоднорідністю. Враховуючи велику відмінність у властивостях як природної, так і вторинної сировини для виготовлення бетону, в залежності від країни і навіть регіону, можна дійти висновку що сфера використання вторинних бетонних заповнювачів потребує подальшого детального дослідження. А саме визначення оптимальних складів бетонів та впровадження максимального використання доступної вторинної сировини, підбір найбільш дієвих хімічних добавок.

Як зазначено вище, в ході **другого етапу роботи** було досліджено бетони для основ дорожнього одягу на вторинному щебені та порівняно ефективність застосування в даних бетонах пластифікаторів різного типу. Також було проведено порівняння властивостей бетону на вторинному щебені з властивостями бетону аналогічного складу на гранітному щебені. Крім того змінювався тип кварцового піску [134].

Для приготування бетонів використовувалися:

- вторинний щебінь фракції 5..20 мм;
- гранітний щебінь фракції 5..20 мм;

- кварцовий пісок Біляєвського кар'єру з модулем крупності 1,56;
- кварцовий пісок Микитівського кар'єра з модулем крупності 2,29.
- добавка суперпластифікатор СП-1 (С-3);
- добавка пластифікатор лігносульфанат;
- добавка суперпластифікатор полікарбоксилатного типу MC-PowerFlow 3200;
- шлакопортландцемент ССШПЦ 400-Д60;
- портландцемент ПЦ II/Б-Ш-400.

Детально властивості даних матеріалів описані у підрозділі 2.3.

Було проведено пошуковий експеримент, в ході якого було визначено ефективність добавок в поєднанні з вторинними та природними заповнювачами, проведено підбір складів бетону, які наведені у таблиці 3.5. Всі бетони мали рівну рухомість S2. При цьому фактично ОК сумішей складала від 4 до 7 см, що досягалося підбором кількості води у складі з його корегуванням.

Таблиця 3.5

Склади досліджених у пошуковому експерименті бетонів

№ складу	Цемент ССШПЦ, кг/м ³	Щебінь вторинний, кг/м ³	Пісок Біляєвського кар'єру, кг/м ³	Добавка, кг/м ³ (%)	Вода, л/м ³	В/Ц
А	320	1170	700	лігносульфанат 3,2 (1%)	221	0,691
В		1180	720	лігносульфанат 4,8 (1,5%)	193	0,603
С		1170	705	СП-1 2,56 (0,8%)	219	0,684

Фізико-механічні показники досліджених у даному пошуковому експерименті бетонів наведені у таблиці 3.6

Таблиця 3.6

Фізико-механічні показники досліджених у пошуковому експерименті бетонів

№ складу	Середня густина, кг/м ³	Міцність у віці 7 діб, МПа	Міцність у віці 28 діб, МПа
А	2158	7,9	15,3
В	2204	9,9	20,4
С	2198	8,0	18,0

Таким чином пошуковий експеримент показав, що найкращі показники міцності як у віці 7 діб, так і у проектному 28 денному віці має склад В, який містить 1,5 % добавки лігносульфаната. Добавка СП-1 не достатньо ефективна в бетонах на основі вторинного щебеню та ССШПЦ400-Д60. З врахування цього на основному етапі було досліджувалися склади бетонів, модифікованих добавкою лігносульфаната у кількості 1,5 % від маси цементу. Склад №1 в подальших дослідженнях даного етапу є ідентичним складу В з таблиці 3.5. Також для порівняння на даному етапі досліджувалися бетони, модифіковані суперпластифікатором полікарбоксілатного типу MC-PowerFlow 3200.

В ході першого робочого експерименту даного етапу в складах досліджених бетонів основ автомобільних доріг змінювався тип щебеню, на якому виготовлявся бетон: вторинний або гранітний. Це дозволяє порівняти властивості бетону на вторинному щебені з властивостями бетону аналогічного складу на «традиційному» гранітному щебені. Також змінювався тип піску: Біляєвського або Вознесенського кар'єру (дрібніший або крупніший). Склади досліджених на даному етапі бетонів наведені в таблиці 3.7. Для всіх складів застосовувався шлакопортландцемент ССШПЦ 400-Д60.

Таблиця 3.7

Склади досліджених бетонів на різних типах щебеню і піску,
цемент ССШПЦ 400-Д60, добавка лігносульфанат

№ складу	Цемент, кг/м ³	Щебінь, тип, кг/м ³	Пісок, тип, кг/м ³	Добавка лігно-сульфанат, кг/м ³	Вода, л/м ³	В/Ц
1	320	вторинний, 1180	Біляєвський, 720	4,8 (1,5 %)	193	0,603
2		гранітний, 1185	Біляєвський, 730		183	0,572
3		вторинний, 1185	Вознесенськ, 735		177	0,553
4		гранітний, 1195	Вознесенськ, 755		146	0,456

Далі з врахуванням того, що бетони на основі дрібнішого піску Біляєвського кар'єру характеризувалися підвищеним В/Ц, на даному другому етапі роботи також були досліджені бетони на основі більш крупного піску Вознесенського кар'єру, модифіковані суперпластифікатором полікарбоксилатного типу MC-PowerFlow 3200. При цьому використовувався портландцемент ПЦ II/Б-III-400 з вміст меленого доменного шлаку до 35 %. Склади досліджених бетонів з використанням піску Вознесенського кар'єру, ПЦ II/Б-III-400 та добавки Power Flow 3200 наведені в таблиці 3.8. Всі бетонні суміші (№1-№7) мали рівну рухомість S2.

Таблиця 3.8

Склади досліджених бетонів на різних типах щебеню,
цемент ПЦ II/Б-III-400, полікарбоксилат MC-PowerFlow 3200

№ складу	Цемент, кг/м ³	Щебінь, тип, кг/м ³	Пісок, тип, кг/м ³	Добавка Power Flow 3200, кг/м ³	Вода, л/м ³	В/Ц
5	320	вторинний, 1185	Вознесенськ, 732	3,84 (1,2 %)	181	0,566
6		вторинний, 1185	Вознесенськ, 740	4,48 (1,4 %)	172	0,537
7		гранітний, 1195	Вознесенськ, 760		144	0,450

Як видно з наведених у таблицях 3.7 і 3.8 даних, бетони на вторинному щебені характеризуються відчутно вищим В/Ц суміші завдяки природно більшій пористості та тріщинуватості поверхні крупного заповнювача.

Для всіх досліджених бетонів (№1-№7) була визначена середня густина і міцність на стиск у віці 28 діб, які наведені у таблиці 3.9.

Таблиця 3.9

Середня густина і міцність на стиск досліджених бетонів
на різних типах щебеню і добавок

№ складу	Середня густина, кг/м ³	Міцність на стиск, МПа
1	2210	20,4
2	2302	22,9
3	2231	21,6
4	2326	24,5
5	2248	22,5
6	2320	29,8
7	2421	31,4

На рис. 3.1 відображена діаграма, яка ілюструє середню густину досліджених бетонів. Аналіз наведених у таблиці 3.9 та на рис. 3.1 даних показує, що середня густина бетонів на вторинному щебені є на 4,2-4,4 % меншою в порівнянні з середньою густиною бетонів на гранітному щебені і аналогічному піску та з аналогічною добавкою. Це обумовлено як більшим В/Ц сумішей, так і особливостями самого щебеню, що є менш щільним, ніж гранітний. Фактично поверхня вторинного щебеню є досить пористою, що впливає як на В/Ц, так і на густину композиту в цілому. При цьому середня густина бетонів на більш крупному піску Вознесенського кар'єру є на 25-30 кг/м³ вищою, ніж середня густина бетонів на аналогічному щебені та більш дрібному піску Біляївського кар'єру.

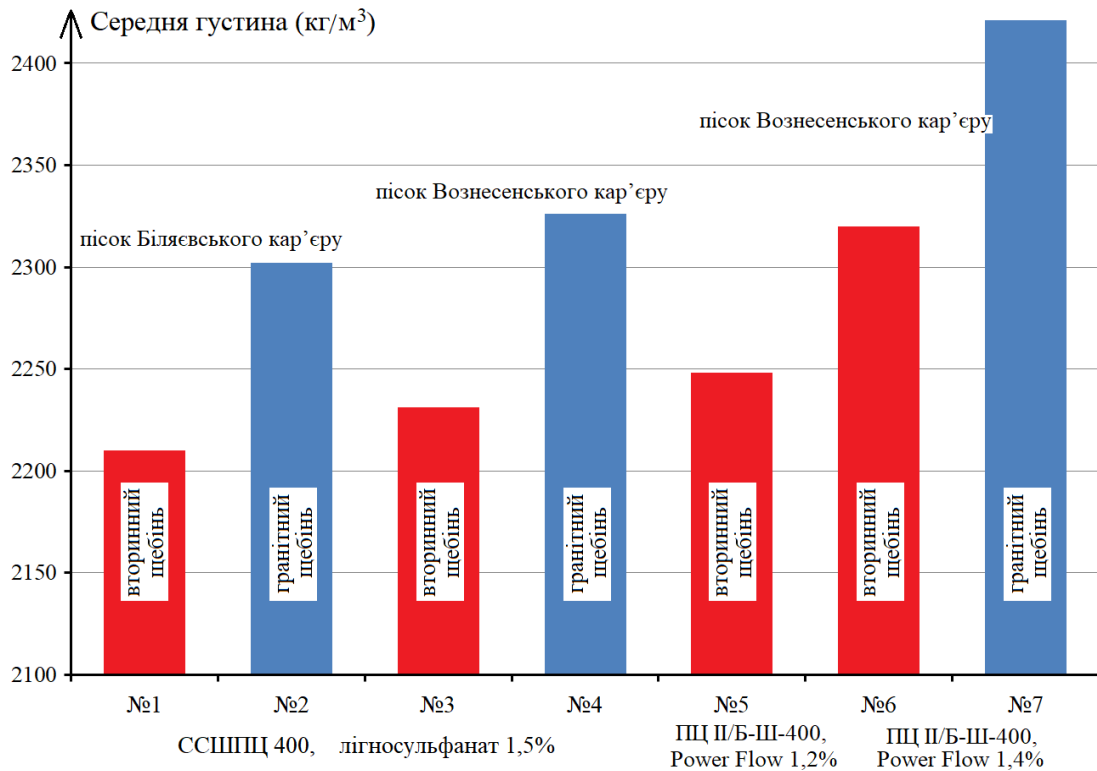


Рис. 3.1 Середня густина досліджених бетонів

На рис. 3.2 зображена діаграма, яка ілюструє міцність на стиск досліджених бетонів на другому етапі. Завдяки описаним вище особливостям вторинного щебеню в композитах на основі цементу ССШПЦ 400-Д60 та при використанні добавки лігносульфанату міцність на стиск бетонів на вторинному щебені є на 12-13 % меншою в порівнянні з міцністю бетонів на гранітному щебені і аналогічному піску. Але при використанні більш ефективної добавки полікарбоксілатного типу MC-PowerFlow 3200 різниця у міцності бетону на вторинному та гранітному щебені складає лише 5,4 %. При цьому міцність бетонів на піску Вознесенського кар'єру є на 4-6 % вищою, ніж міцність бетонів на аналогічному щебені та більш дрібному піску Біляєвського кар'єру. Також можна відмити, що бетони складів №6 і №7 завдяки нижчому В/Ц та використанню цементу з меншою часткою доменного шлаку характеризувалися найбільшою міцністю серед досліджених.

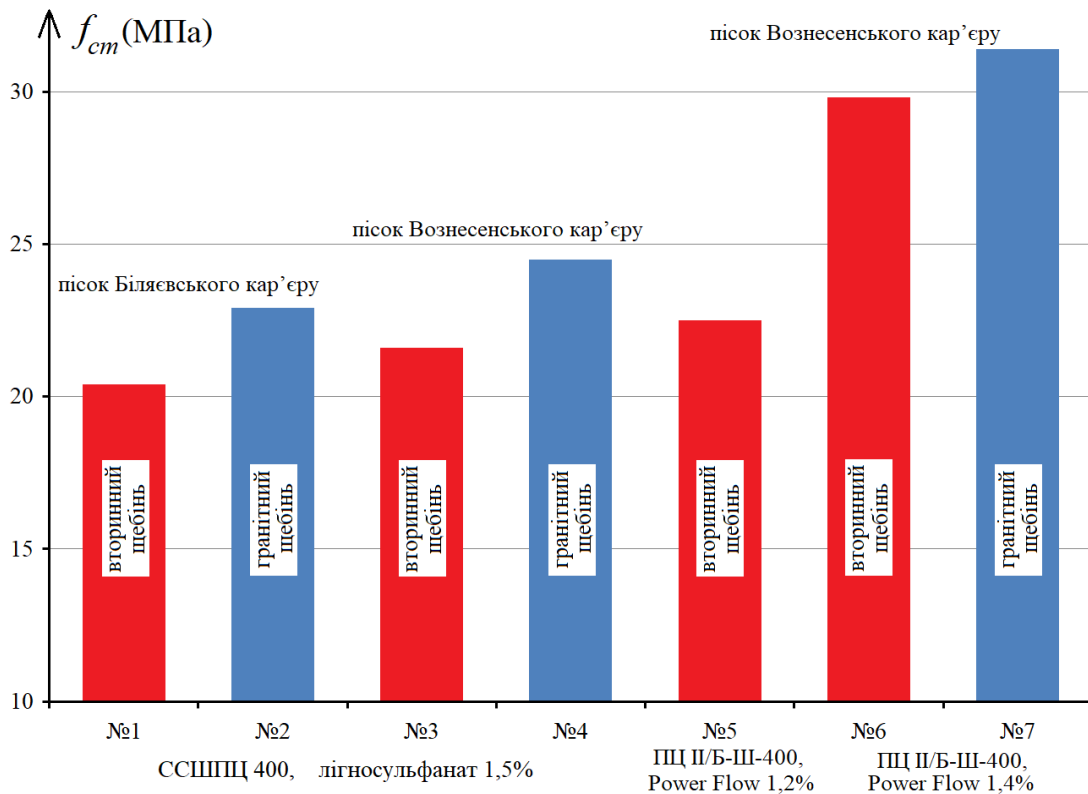


Рис. 3.2 Міцність на стиск досліджених бетонів

Для складів №6 і №7 в рамках даного етапу роботи також була визначена міцність на розтяг при згині, яка відповідно склала 2,75 МПа і 2,87 МПа, що відрізняється лише на 4 %. Таким чином міцність на розтяг при згині бетонів на вторинному щебені майже не відрізнялася від міцності на розтяг аналогічного бетону на гранітному щебені. Це можна пояснити особливостями роботи заповнювача з пористою поверхнею, яка характеризується високою адгезією до цементно-піщаної матриці, що в свою чергу позитивно впливає на роботу композиту при розтягуванні [135].

В цілому бетони на вторинному щебені із використанням цементів, що містять шлак, можуть ефективно використовуватися для основ автомобільних доріг. Такі бетони характеризуються досить великою міцністю на розтяг при згині при задовільній міцності на стиск, що позитивно відображається на експлуатаційних властивостях, зокрема завдяки запобіганню утворення колійності [136].

Також результат даного етапу роботи показав, що сучасний суперпластифікатор полікарбоксилатного типу є більш ефективним для бетонів

на основі вторинних заповнювачів, ніж лігносульфанат та добавка СП-1 (продукт поліконденсації нафталін-сульфоїкислоти та формальдегіду), що враховано на наступних етапах дослідження.

3.4 Властивості бетонів з різними типами крупного і дрібного заповнювача

3.4.1 Умови експерименту і склади досліджених бетонів

Я зазначено вище, на **третьому етапі** роботи досліджувалися властивості бетонів з різними типами крупного заповнювача: гранітного гравію, вторинного щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки, а також з різними типами пісків: кварцовим, вторинним з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинним з переробленої цегляної кладки.

Для виготовлення бетонів на даному етапі використовувалися наступні матеріали.

Три види крупного заповнювача фракції 8-16 мм:

- гранітний річковий гравій, $\rho_n=1570 \text{ кг/м}^3$;
- вторинний щебінь з перероблених залізобетонних конструкцій, $\rho_n=1260 \text{ кг/м}^3$
- вторинний щебінь з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки, $\rho_n=1150 \text{ кг/м}^3$.

Три види пісків фракції 0-4 мм:

- кварцовий пісок, $M_{кр}=3,19$, $\rho_n=1935 \text{ кг/м}^3$;
- вторинний пісок з перероблених залізобетонних конструкцій, $M_{кр}=3,53$, $\rho_n=1500 \text{ кг/м}^3$;
- вторинний пісок з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки, $M_{кр}=3,72$, $\rho_n=1375 \text{ кг/м}^3$.

Портландцементи СЕМ II/B-S 32.5 R і СЕМ II/B-S 42.5 N.

Суперпластифікатори полікарбосилатного типу Soudal Soudaplast та Berament HT28.

Детально властивості даних матеріалів описані у підрозділі 2.3.

На основі отриманого досвіду та з врахуванням результатів досліджень попередніх етапів, було розроблено склади бетонів з використанням різних видів та фракцій вторинних заповнювачів, які маркувалися 1a-5a, 1b-5b та 1c-5c, 1d-5d (Таблиця 3.10).

Таблиця 3.10

Склади досліджених бетонів основи дорожнього одягу

№	Цемент (тип, кг/м ³)	Крупний заповнювач (тип, кг/м ³)	Пісок (тип, кг/м ³)	Добавка (тип, кг/м ³)	Вода (л/м ³)	В/Ц
Перша серія експерименту						
1a	СЕМ П/В-S 32.5 R, 300	гранітний гравій, 1245	кварцовий, 735	Soudal Soudaplast, 3	132	0,440
2a		вторинний з з/б конструкцій, 1100			142	0,473
3a		вторинний з цегляної кладки, 980			180	0,600
4a		вторинний з з/б конструкцій, 1100	вторинний з з/б конструкцій, 665		169	0,563
5a		вторинний з цегляної кладки, 980	вторинний з цегляної кладки, 580		231	0,770
1b	СЕМ П/В-S 32.5 R, 350	гранітний гравій, 1230	кварцовий, 695	Soudal Soudaplast, 3,5	144	0,411
2b		вторинний з з/б конструкцій, 1085			146	0,417
3b		вторинний з цегляної кладки, 965			192	0,549
4b		вторинний з з/б конструкцій, 1085	вторинний з з/б конструкцій, 625		174	0,497
5b		вторинний з цегляної кладки, 965	вторинний з цегляної кладки, 530		242	0,691
Друга серія експерименту						
1c	СЕМ П/В-S 42.5 N, 300	гранітний гравій, 1252	кварцовий, 762	Berament HT28, 3,6	124	0,413
2c		вторинний з з/б конструкцій, 1122			138	0,460
3c		вторинний з цегляної кладки, 982			175	0,583
4c		вторинний з з/б конструкцій, 1070	вторинний з з/б конструкцій, 755		168	0,560
5c		вторинний з цегляної кладки, 803	вторинний з цегляної кладки, 765		229	0,762

№	Цемент (тип, кг/м ³)	Крупний заповнювач (тип, кг/м ³)	Пісок (тип, кг/м ³)	Добавка (тип, кг/м ³)	Вода (л/м ³)	В/Ц
1d	СЕМ ІІ/В-S 42.5 N, 350	гранітний гравій, 1233	кварцовий, 727	Verament HT28, 4,2	136	0,389
2d		вторинний з з/б конструкцій, 1112			141	0,403
3d		вторинний з цегляної кладки, 968			183	0,523
4d		вторинний з з/б конструкцій, 992	вторинний з з/б конструкцій, 752		166	0,474
5d		вторинний з цегляної кладки, 789	вторинний з цегляної кладки, 704		232	0,663

Було проведено 2 серії експериментів. У першій серії (склади №1а – №5а, №1b – №5b) використовувався портландцемент СЕМ ІІ/В-S 32.5 R (містить до 35 % доменного шлаку) та добавка суперпластифікатор Soudal Soudaplast. Кількість добавки становила 1% від маси цементу.

У другій серії (склади №1с – №5с, №1d – №5d) використовувався портландцемент СЕМ ІІ/В-S 42.5 N (містить 21 % доменного шлаку) та добавка суперпластифікатор Verament HT28. Кількість добавки становила 1,2 % від маси цементу.

Раціональну кількість для обох добавок суперпластифікаторів було встановлено за результатами попередніх експериментів та рекомендацій виробників.

В ході даного етапу з використанням складів бетону першої серії 1а-5а та 1b-5b, було проведено порівняння властивостей бетону в залежності від виду дрібного заповнювача. Тобто порівняно характеристики бетону на основі вторинних заповнювачів та природніх. В ході другої серії експериментів (1с-5с та 1d-5d) було виготовлено модифіковані бетони, відповідно до даних та рекомендацій отриманих в ході першої серії експерименту. Було використано інший тип цементу та суперпластифікатору, збільшено його дозування, відкореговано співвідношення крупного та дрібного заповнювачів.

Проведено порівняння властивостей бетону на основі різних типів крупного заповнювача: гранітного гравію, вторинного щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з переробленої цегляної кладки

та керамічної плитки. В якості дрібного заповнювачу також було використано три типи пісків: кварцовий, вторинний з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинний з переробленої цегляної кладки. Таким чином, у кожній серії досліджено бетони на основі гранітного гравію та кварцового піску (контрольний склад), вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій та кварцового піску, вторинного щебеню з цегляної кладки та кварцового піску, вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій та вторинного піску з залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з цегляної кладки та керамічної плитки і вторинного піску з цегляної кладки [118].

Згідно ДБН В.2.3-4:2015 [137] при використанні бетоноукладача з ковзною опалубкою рухомість бетонної суміші для основ дорожнього одягу повинна бути від 1 до 5 см, в залежності від швидкості руху бетоноукладача. Також можливе використання сумішей з жорсткістю від 3 до 10 см. Рухомість всіх досліджених сумішей в рамках експериментів даного етапу роботи знаходилася у діапазоні ОК від 1 до 2 см. Для забезпечення необхідної рухомості при різних складах бетонів варіювалася кількість води. Склади досліджених бетонів основи дорожнього одягу (обох серій експерименту) наведені у таблиці 3.10 [118].

3.4.2 В/Ц бетонних сумішей

У зв'язку з використанням різних видів природних та вторинних заповнювачів, двох видів цементу в кількості 300 і 350 кг/м³, та двох видів добавок суперпластифікаторів, водопотреба досліджених бетонних сумішей суттєво відрізнялася. В наслідок цього змінювалася В/Ц сумішей, що відображено на діаграмі на рис. 3.3.

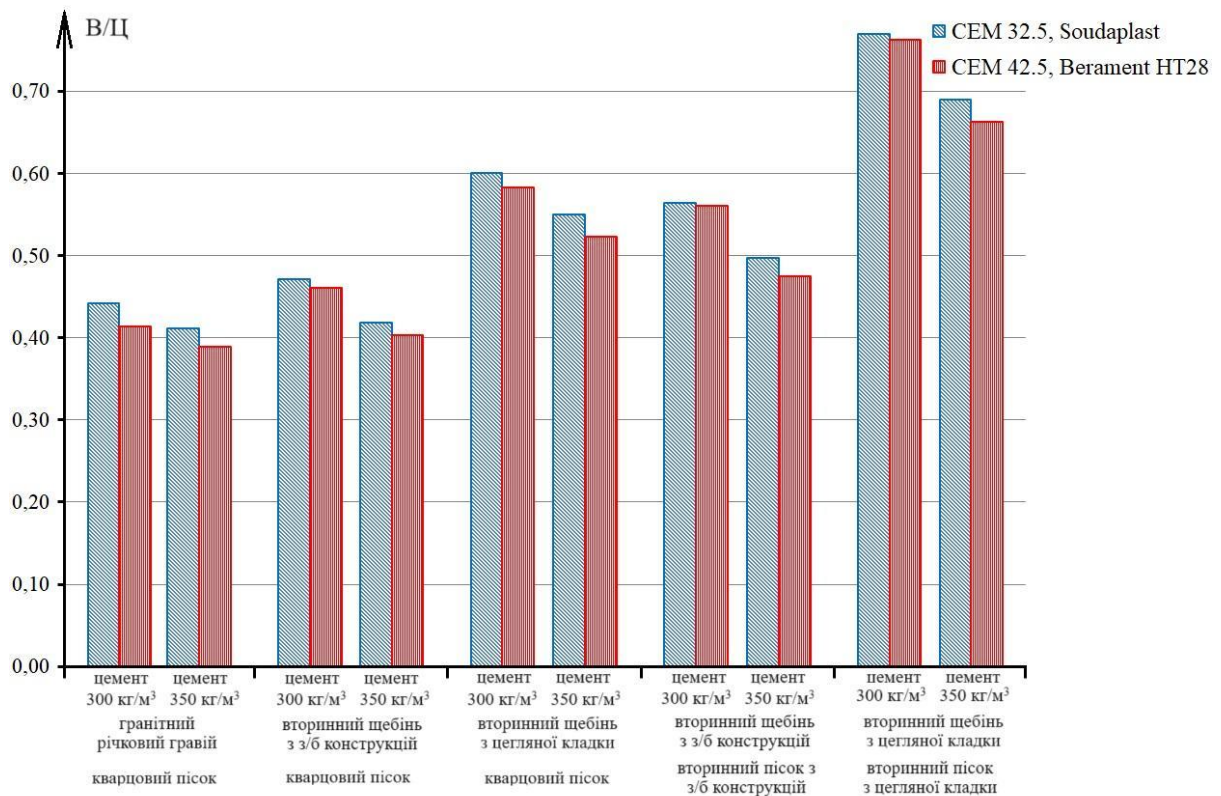


Рис. 3.3 Вплив складу бетонів на В/Ц сумішей (ОК=1..2 см)

Відповідно до даних з діаграми на рис. 3.3 та таблиці 3.10, бетони з суперпластифікатором Berament HT28 мають меншу В/Ц суміші, ніж бетони з аналогічними заповнювачами, але з використанням суперпластифікатора Soudal Soudaplast. Різна ефективність добавок також може бути обумовлена різними типами цементу, що застосовуються у першій та другій серії експерименту [138, 139]. Найменше В/Ц очікувано мали бетони на основі річкового гравію та кварцового піску. При використанні вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій В/Ц сумішей зростало у зв'язку з поглинанням частини води більш пористим заповнювачем (водопоглинання річкового гравію – 0,70 %, щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій – 5,94 %, щебінь з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки – 8,53 %). Відповідно використання вторинного щебеню з цегляної кладки та керамічної плитки викликало необхідність ще більшого підвищення В/Ц суміші, що обумовлено ще вищою пористістю такого вторинного заповнювача.

При використанні вторинного щебеню одночасно зі вторинним піском В/Ц сумішей ще додатково підвищувалася і максимальним було В/Ц для бетонів на основі вторинного заповнювача крупної та дрібної фракції з цегляної кладки та керамічної плитки (№ 5а та 5с). Варто підкреслити, що значна частина води в бетонах на пористих вторинних заповнювачах витрачається саме на насичення заповнювача. Це має досить неоднозначний вплив на структуру бетону: з одної сторони це підвищує сумарну пористість вихідного матеріалу, проте з іншого боку покращує умови твердіння бетону та зчеплення між щебенем та цементно-пісчаною матрицею [139, 140]. Варто зазначити, що міцність і пористість заповнювача чинять суттєвий вплив на всі властивості бетону, зокрема на його міцність.

3.4.3 Середня густина досліджених бетонів

Зміна типу заповнювача а також водопотреби суміші природно впливала на структуру і всі властивості бетонів, зокрема на середню густину. Цей показник визначалася для всіх досліджених бетонів, дані наведені у таблиці 3.11.

На рис. 3.4 показано діаграму, яка відображає середню густину досліджених бетонів для основ дорожнього одягу. Аналіз діаграми на рис. 3.4 та даних таблиці 3.11 показує, що бетони другої серії експерименту 1с-5с, 1d-5d (портландцемент СЕМ ІІ/В-S 42.5 N, суперпластифікатор Verament НТ28) мають вищу середню густину, ніж бетони з аналогічними заповнювачами першої серії експерименту 1а-5а, 1b-5b. Це пояснюється меншим В/Ц сумішей за рахунок застосування більш ефективного суперпластифікатору. Як для першої так і для другої серії експерименту збільшення кількості портландцементу з 300 до 350 кг/м³ несуттєво впливає на середню густину бетонів.

Таблиця 3.11

Середня густина досліджених бетонів для основ дорожнього одягу

№	Середня густина, кг/м ³	№	Середня густина, кг/м ³
Перша серія експерименту		Друга серія експерименту	
1a	2369	1c	2458
2a	2303	2c	2341
3a	2171	3c	2238
4a	2214	4c	2288
5a	2015	5c	2061
1b	2373	1d	2465
2b	2298	2d	2358
3b	2164	3d	2238
4b	2224	4d	2247
5b	2030	5d	2034

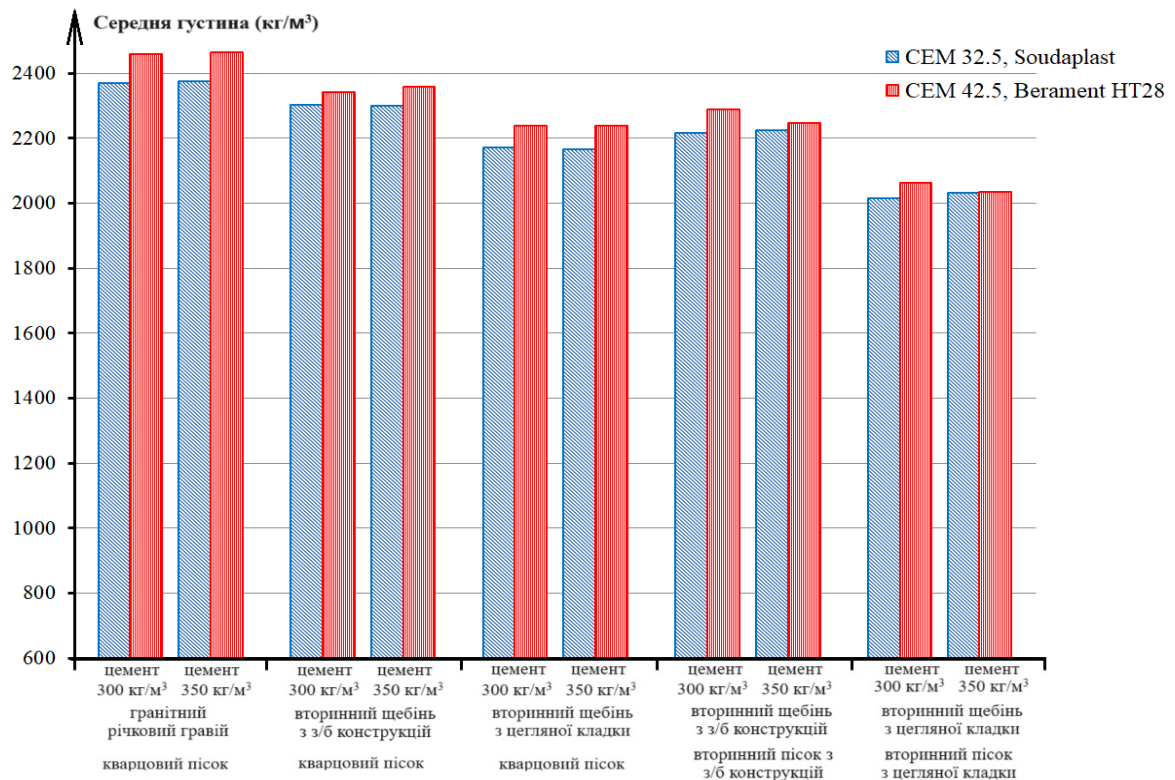


Рис. 3.4 Середня густина досліджених бетонів

Загальний вплив виду заповнювачів на середню густину бетонів є аналогічним для обох серій експерименту даного етапу роботи. Найбільшу густину мають бетони на основі гранітного річкового гравію і кварцового піску. При використанні вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій середня густина знижується на 3-5 %. При використанні вторинного щебеню з цегляної кладки та керамічної плитки – на 8-9 %. Бетони на основі вторинного заповнювачу крупної та дрібної фракції з залізобетонних конструкцій мають на 6-9 % меншу середню густину у порівнянні з «контрольними» складами на гранітному гравії. Найменшу середню густину (від 2015 до 2061 кг/м³) мають бетони на основі вторинного заповнювачу крупної та дрібної фракції з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки. Це на 14-17 % менше середньої густини бетонів «контрольного» складу на річковому гравії. Такий вплив заповнювачів є очікуваним та пояснюється їх власною середньою густиною та пористістю [134].

3.4.4 Міцність бетонів на стиск

Міцність на стиск не є показником, що жорстко регламентується для бетонів основ дорожнього одягу такими нормативними документами як ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [137] та ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [32]. Проте цей показник є одним з визначаючих для значення модуля пружності матеріалу та відповідно впливає на його роботу в складі конструкції дорожнього одягу.

В ході третього етапу досліджень для бетонів обох серій експерименту (1a-5a, 1b-5b та 1c-5c, 1d-5d) було визначено їх міцність на стиск у віці на 3 та 28 діб. Результати представлено в таблиці 3.12.

За даними таблиці 3.12 була побудована діаграма, яка відображає міцність на стиск досліджених бетонів для основ дорожнього одягу у віці 3х і 28 діб (рис. 3.5).

Таблиця 3.12

Міцність на стиск досліджених бетонів для основ дорожнього одягу

№	Міцність на стик у віці 3х діб, МПа	Міцність на стик у віці 28ми діб, МПа
Перша серія експерименту		
1a	12,21	23,88
2a	14,78	25,35
3a	8,28	16,88
4a	10,40	20,27
5a	4,39	10,95
1b	14,21	29,57
2b	17,97	32,07
3b	11,70	24,85
4b	13,85	22,40
5b	6,39	16,07
Друга серія експерименту		
1c	28,28	47,99
2c	29,45	49,16
3c	21,29	41,63
4c	15,61	35,47
5c	13,04	27,05
1d	29,81	50,18
2d	30,33	53,41
3d	22,23	42,66
4d	23,62	39,77
5d	13,85	27,65

Аналіз діаграм та даних таблиці 3.12 показує, що на міцність досліджених бетонів вид використаного портландцементу, суперпластифікатору та заповнювачів оказує суттєво більший вплив, ніж на середню густину.

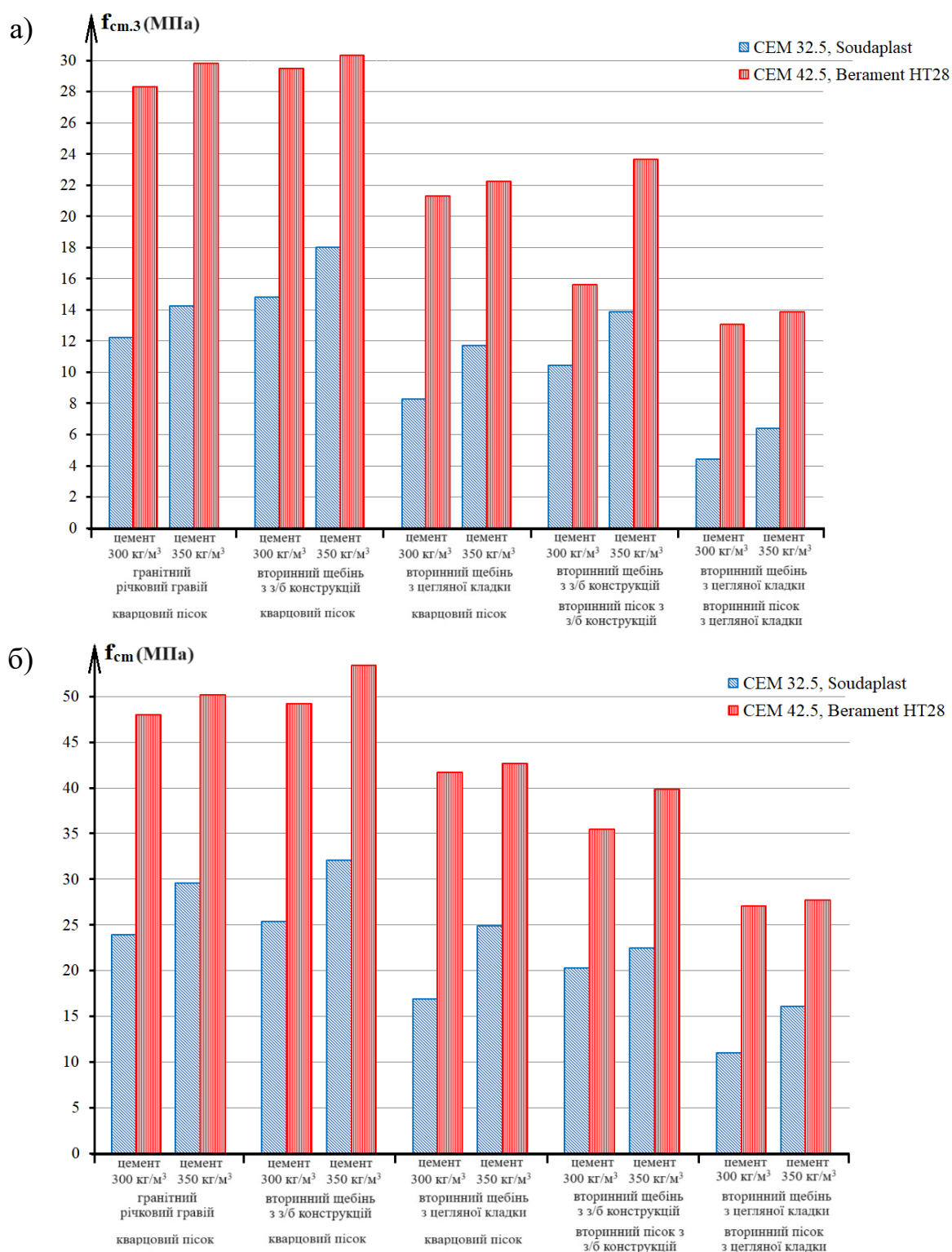


Рис. 3.5 Міцність досліджених бетонів у віці 3-х діб (а) та 28-ми діб (б)

Міцність бетонів другої серії експерименту була набагато вищою у порівнянні з міцністю бетонів першої серії з аналогічними заповнювачами. У віці 3х діб різниця складала від 69 до 190 %, у віці 28ми діб – від 67 до 147 %. Це пояснюється застосуванням цементу з більш високою активністю (марки 500) та

одночасно більш ефективної добавки суперпластифікатору Verament NT28, яка забезпечила нижче В/Ц сумішей.

Загальні тенденції впливу типу заповнювача на міцність є аналогічними для бетонів першої і другої серій експерименту. При використанні кварцового піску найбільшу міцність у віці 3 і 28 діб мають бетони на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій – до 30,3 МПа та 53,4 МПа відповідно. У віці 28ми діб міцність бетонів на такому вторинному щебені на 2-8 % вище міцності бетонів на гранітному гравії. Такий ефект пояснюється насамперед застосуванням у бетонах «контрольних» складів річкового гравію, який має обкатану форму. Відомо, що гравій має меншу адгезію до цементно-піщаної матриці, ніж щебінь, що впливає на міцність композиту [139]. Вторинний щебінь має грубішу та шорсткішу форму і відносно високу пористість, що забезпечує достатню адгезію з цементно-піщаною матрицею бетону та покращує умови твердіння [140]. Для багатьох європейських країн річковий гравій є основним типом крупного заповнювача для бетонів, гранітний щебінь майже не використовується. Тому склади на основі крупного заповнювача з річкового гравію та кварцового піску розглядаються як базові склади бетонів для порівняння їх характеристик з іншими експериментальними бетонами.

3.4.5 Міцність досліджених бетонів на розтяг при згині

Для бетонів дорожніх покриттів та основ дорожнього одягу міцність на розтяг при згині є більш важливим показником якості, ніж міцність на стиск. Це обумовлено особливостями навантажень на дорожній одяг.

Згідно ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [137] для монолітної основи мінімальний клас бетону на розтяг при згині становить V_{tb} 0,8 (10 кгс/см²). Відповідно ГБН В.2.3-37641918-557:2016 «Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування» [32] для шарів основи рекомендується бетони з проектним класом за міцністю на розтяг при згині V_{tb} 1,0 і V_{tb} 1,2. Більше значення міцністю на розтяг при згині забезпечує вищу надійність основи,

особливо в умовах неоднорідності якості вторинного заповнювача.

Для бетонів другої серії експерименту (1c-5c, 1d-5d) визначалася міцність на розтяг при згині у віці 28 діб [141]. Дані представлені в таблиці 3.12 та на діаграмі на рис. 3.6.

Таблиця 3.12

Міцність на розтяг досліджених бетонів для основ дорожнього одягу

№	Міцність на розтяг у віці 28ми діб, МПа
1c	3,61
2c	3,77
3c	3,18
4c	3,37
5c	2,82
1d	3,62
2d	3,84
3d	3,35
4d	3,57
5d	2,89

Аналіз діаграми показує, що при використанні кварцового піску найбільшу міцність на стиск і на розтяг при згині мали бетони на щебені з залізобетонних конструкцій (№2а, №2b). Міцність бетонів на такому вторинному щебені на 2-6 % вище міцності бетонів на гранітному гравії, що пояснюється застосуванням у «контрольних» бетонах гранітного гравію обкатаної форми.

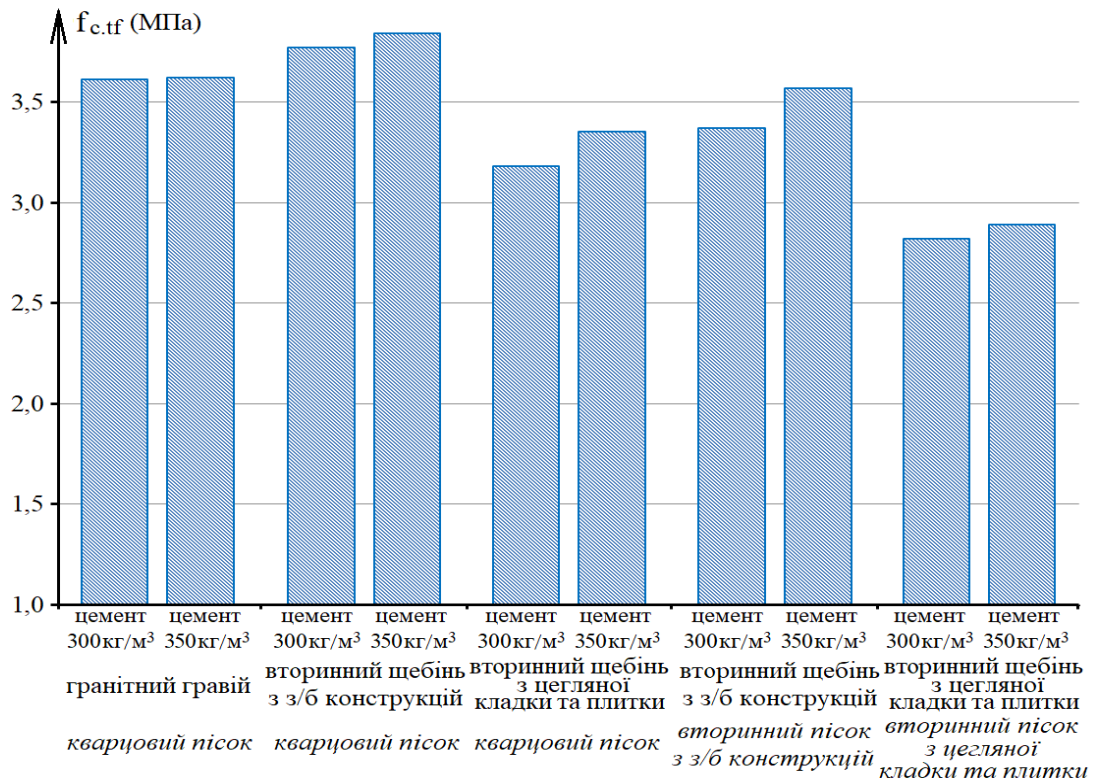


Рис. 3.6 Міцність досліджених бетонів другої серії на розтяг при згині

При використанні вторинного щебеню з цегляної кладки та керамічної плитки і кварцового піску (№3а, №3б) міцність бетону стає меншою у порівнянні з бетонами на гранітному гравії на 7-15 %. При використанні вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій одночасно з вторинним піском (№4а, №4б) міцність бетонів на стиск знижується на 20-26 % у порівнянні з бетонами «контрольних» складів, але міцність на розтяг при згині при цьому змінюється лише на 2-7 %. При використанні вторинного щебеню і піску з цегляної кладки та керамічної плитки (№5а, №5б) міцність бетонів на розтяг при згині є меншою на 20-21 %. Тобто бетони на вторинних заповнювачах характеризуються достатньо високою міцністю на розтяг при згині, що обумовлено пористою структурою заповнювача. Така структура забезпечує високу адгезію до піщано-цементної матриці і сприяє підвищенню стійкості до дії напружень розтягування [140].

В цілому всі досліджені на даному етапі роботи бетони на вторинних заповнювачах характеризувалися достатньою високою міцністю, зокрема на розтяг при згині.

3.4.6 Водопоглинання та морозостійкість бетонів

Для бетонів другої серії експериментів (1с-5с, 1d-5d) було визначено їх водопоглинання за об'ємом. Фактично даний показник відображає відкриту пористість матеріалу, яка, як відомо, суттєво впливає на механічні характеристики матеріалу. Данні з водопоглинанням зразків наведено в таблиці 3.13 та на діаграмі на рис. 3.7.

Таблиця 3.13

Водопоглинання досліджених бетонів для основ дорожнього одягу

№	Водопоглинання, %
1с	6,2
2с	7,6
3с	9,7
4с	7,8
5с	13,9
1d	5,6
2d	7,6
3d	8,7
4d	7,7
5d	12,4

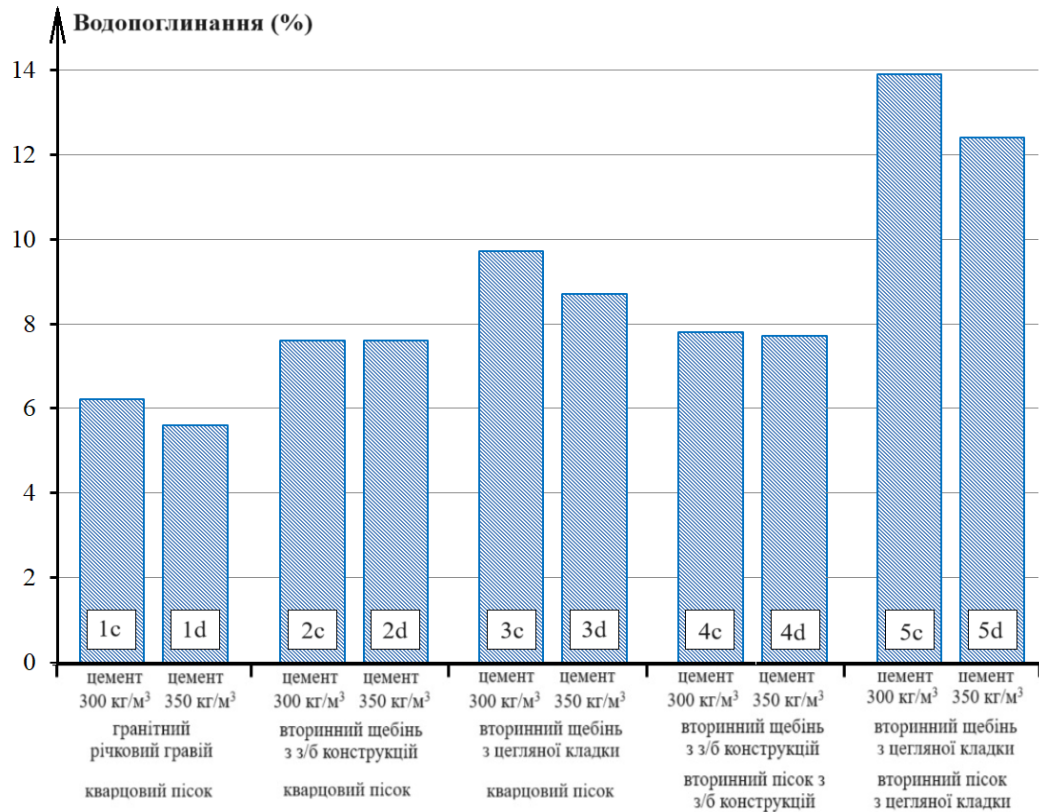


Рис. 3.7 Водопоглинання бетонів другої серії

Як видно з діаграми та даних таблиці 3.13, водопоглинання складів бетону безпосередньо залежить від середньої густини бетонів – для бетонів з нижчою густиною водопоглинання зростає та навпаки. Це пояснюється заповненням водою пор бетону, кількість яких більша для складів з нижчою середньою густиною [141].

Найбільше водопоглинання мають бетони з вторинним щебенем і піском з цегляної кладки і керамічної плитки, що пояснюється наявністю пористого піску. Завдяки поєднанню двох найбільш пористих заповнювачів водопоглинання складів 5c і 5d є приблизно вдвічі вищим, ніж «контрольних» складів 1c і 1d при аналогічній кількості цементу. Проте як показано вище, такі бетони за міцністю все одно повністю задовольняють вимогам до матеріалів для основ жорстких дорожніх покриттів.

В дослідженнях багатьох вчених [14, 35, 67] та інших показано, що в кліматичних умовах більшості європейських країн, включаючи Україну,

основними показниками якості, які обумовлюють довговічність жорстких дорожніх покриттів, є морозостійкість та зносостійкість бетону. Проте бетон основи дорожнього одягу не так інтенсивно піддається заморожуванню і відтаванню, як верхні шари покриттів. Відповідно згідно ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [137] для монолітної основи морозостійкість бетону при середньомісячній температурі найбільш холодного місяця від 0 до мінус 5°C має бути не нижче F25, при середньомісячній температурі від мінус 5 до мінус 10°C – не нижче F50.

Випробування на морозостійкість досліджених бетонів основ дорожнього одягу проводилось за прискореною методикою згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 [122] (третій метод при заморожуванні та відтаванні у соленій воді при температурі заморожування до -50°C). Важливо зауважити, що точність даного прискореного методу є обмеженою, проте точніші методи є занадто довгими у реалізації і трудомісткими. Для бетонів дорожніх і аеродромних покриттів прискорений метод розрізняє лише марки F100, F150, F200 і вище [123].

За результатами експерименту було встановлено, що для досліджених складів бетонів 1с-5с, 1d-5d рівень морозостійкості складає F100 [141]. Цей показник вдвічі більше за мінімальний необхідний рівень морозостійкості для монолітної основи, визначений вимогами ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [137].

Таким чином всі досліджені бетони на вторинних заповнювачах забезпечували достатню для основ дорожнього одягу морозостійкість, і як показано вище, міцність. Фактичні рівні міцності та морозостійкості отриманих у лабораторних умовах бетонів на вторинних заповнювачах є приблизно вдвічі вищими за вимоги ДБН В.2.3-4:2015 «Автомобільні дороги» [137] для монолітної основи. Це дозволяє зробити висновок про можливість широкого використання таких бетонів в основах жорсткого дорожнього одягу.

3.4.7 Ударостійкість досліджених бетонів

Для бетонів дорожніх покриттів важливим показником якості є їх ударостійкість у зв'язку з постійним динамічним навантаженням від рухомого транспорту на дорожнє полотно.

Бетон основи дорожнього одягу піддається меншому динамічному впливу, ніж верхні шари покриття. Проте в зоні швів, які влаштовуються в цементобетонних покриттях, на бетон основи також передається частина динамічних навантажень.

В ході дисертаційного дослідження за описаною у параграфі 2.2 методикою було визначено ударостійкість досліджуваних бетонів другої серії експериментів даного третього етапу роботи (склади 1с-5с, 1d-5d). Отримані дані щодо ударостійкості бетонів представлено в таблиці 3.14 та на діаграмі на рис. 3.8.

Таблиця 3.14

Ударостійкість досліджених бетонів для основ дорожнього одягу

№	Загальна робота, витрачена на руйнування зразка, Дж/см ²
1с	1,921
2с	1,976
3с	2,395
4с	2,005
5с	2,515
1d	1,915
2d	1,985
3d	2,485
4d	2,035
5d	2,591

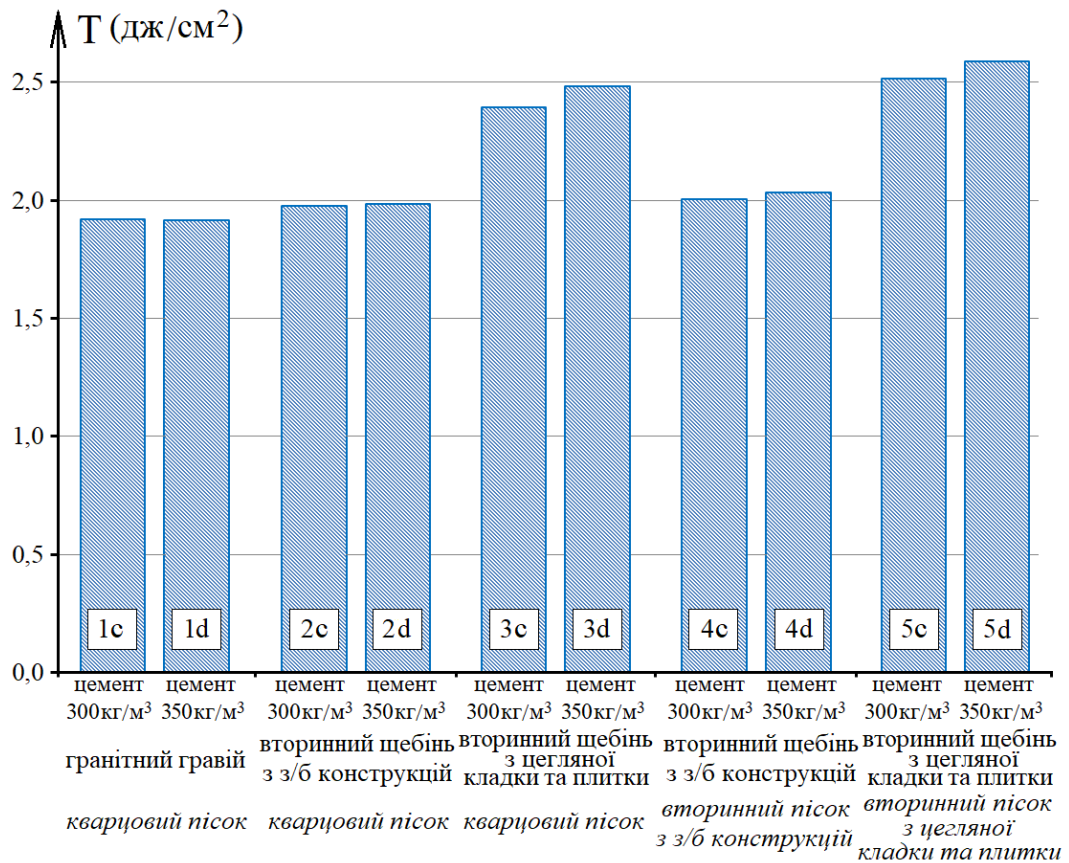


Рис. 3.8 Ударостійкість бетонів 2 серії

Як видно з даних таблиці та діаграми, кількість цементу мало впливає на ударостійкість бетонів. Це пов'язано з тим, що більш міцні бетони, з більшою кількістю в'язучого, є одночасно більш крихкими.

Ударостійкість складів на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій майже не відрізняється від ударостійкості «контрольних» складів на гранітному гравії та кварцовому піску. При цьому заміні кварцового піску в бетонах на такому щебені вторинним піском навіть дещо підвищує ударостійкість матеріалу. Значення T для складів 4c, 4d є на 4,3 – 6,2 % вищими, ніж для «контрольних» складів.

Найбільшу ударостійкість мали зразки бетону на основі найбільш пористих вторинних заповнювачів. Ударостійкість бетонів на основі щебеню з подрібненої цегляної кладки та керамічної плитки та кварцового піску (3c, 3d) була на 24-30 % вищою у порівнянні з бетонами «контрольних» складів. При використанні поритого піску ударостійкість бетонів ще підвищується. Значення T для бетонів

на основі вторинного щебеню з подрібненої цегляної кладки та керамічної плитки та вторинного піску з аналогічних матеріалів була на 31-35 % більшим міцність ударостійкість «контрольних» складів 1с і 1d. Збільшення ударостійкості бетонів на основі пористих керамічних заповнювачів свідчить про можливість таких розсіювати динамічне навантаження удару та зберігати цілісність бетону [142]. Тобто не зважаючи на те, що склади 5с та 5d очікувано показали найменшу міцність на стиск та на розтяг при згині, вони значно краще опираються динамічним впливам, порівняно з іншими складами.

Враховуючи викладене вище, можна зробити висновки, що вторинний заповнювачі з подрібненої цегляної кладки та керамічної плитки є досить ефективними для виготовлення стійких до впливу ударів бетонів, що є досить важливим показником для дорожнього будівництва. Найбільшої ефективності можливо досягнути при використанні таких заповнювачів крупної та дрібної фракції.

3.4.8 Приблизна собівартість досліджених бетонів

Враховуючи ринкову вартість сировини для виготовлення досліджених бетонів серії 1с-5с, за умов оптової закупівлі матеріалів та з врахуванням діючих у Європейському союзі стимулів (субсидій) до використання вторинних матеріалів, була розрахована приблизна собівартість бетонів, яка представлена в таблиці 3.15. Ціни актуальні станом на лютий 2024 року для Словаччини.

Проаналізувавши собівартість бетонів серії 1с-5с можна зробити висновок, що склад 2с, виготовлений із вторинного щебеню та кварцового піску, на 13,3% дешевший за «контрольний склад» 1с на річковому гравії та кварцовому піску. Склад 3с на вторинному щебені з кладки та керамічної плитки та кварцовому піску виявився на 28,4 % дешевшим за «контрольний склад». А склад бетону 5с на основі крупного та дрібного заповнювачу з кладки та керамічної плитки є на 37,4 % дешевшим за склад на річковому гравії та кварцовому піску. Враховуючи достатньо високі фізико-механічні показники, бетони виготовлені на вторинних

заповнювачах мають значно нижчу ціну собівартості, що показує високу рентабельність їх використання.

Таблиця 3.15

Собівартість бетонів серії 1с-5с

Склад бетону	Ціна за м ³ , євро
1с	83,9
2с	72,7
3с	60,1
4с	67,9
5с	52,5

Звичайно, в умовах України економічна ефективність використання бетонів на вторинних заповнювачах буде іншою. Проте вона буде все одно високою з врахуванням необхідності утилізації відходів від демонтажу зруйнованих будинків і споруд.

Висновки за 3-м розділом

1. Проведена оцінка позитивного впливу на навколишнє середовище використання продуктів демонтажу будівель та споруд в рамках їх життєвого циклу.

2. Проаналізовано ефективність основних технологій видобутку вторинних заповнювачів з відходів демонтажу будівель.

3. Визначено ефективність застосування пластифікаторів різного типу в бетонах основ автомобільних доріг на вторинному щебені. Проведено порівняння властивостей бетонів з рідними видами цементів та пісками різної крупності.

4. Підтверджено ефективність застосування бетонів на вторинних заповнювачах для влаштування основи жорсткого дорожнього одягу.

5. Порівняно властивості бетонів з різними типами крупного заповнювача: гранітного річкового гравію, вторинного щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки. Також використовувалося три типу пісків: кварцовий, вторинний з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинний з переробленої цегляної кладки. Проведено 2 серії експериментів. У першій використовувався портландцемент СЕМ ІІ/В-S 32.5 R та суперпластифікатор Soudal Soudaplast, у другій – портландцемент СЕМ ІІ/В-S 42.5 R та суперпластифікатор Verament NT28.

6. Всі досліджені бетони на вторинних заповнювачах характеризувалися достатньою високою міцністю, зокрема на розтяг при згині (від 2,82 до 3,84 МПа). Також бетони забезпечували достатню для основ дорожнього одягу морозостійкість (F100) та високу ударостійкість. Фактичні рівні міцності та морозостійкості отриманих у лабораторних умовах бетонів на вторинних заповнювачах є приблизно вдвічі вищими за вимоги ДБН В.2.3-4:2015 [137] для монолітної основи. Це підтверджує можливість широкого використання таких бетонів в основах жорсткого дорожнього одягу.

РОЗДІЛ 4

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНІВ І ФІБРОБЕТОНІВ ДЛЯ ОСНОВ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ НА НЕОДНОРІДНИХ ВТОРИННИХ ЗАПОВНЮВАЧАХ

4.1 Дослідження впливу однорідності вторинних заповнювачів на характеристики бетонів для основ дорожнього одягу

Як відомо, властивості заповнювача суттєво впливають на структуру і фізико-механічні характеристики бетонів [143]. Неоднорідність вторинного щебеню, яка виникає в процесі переробки демонтованих і зруйнованих будівельних конструкцій на вторинний заповнювач, все ще залишається одним з основних стримуючих факторів його масового застосування для виробництва бетону. При переробці бетонних конструкцій, які були пошкоджені внаслідок бойових дій, досягнути однорідності вторинного матеріалу ще важче. Це пов'язано з тим, що демонтаж конструкцій проводиться не за планом та в умовах вірогідного додаткового забруднення супутніми матеріалами [83]. Тому **на четвертому етапі** роботи було проведено дослідження впливу однорідності вторинних заповнювачів на характеристики бетонів для основ дорожнього одягу.

Порівнювалися властивості бетонів трьох складів:

- на основі річкового гравію та кварцового піску, «контрольний» склад, № 1е. Він є аналогічним складу 1с з попереднього третього етапу досліджень;
- на основі вторинного щебеню із залізобетонних конструкцій та кварцового піску, № 2е. Він є аналогічним складу 2с з попереднього третього етапу досліджень;
- на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом та кварцового піску № 3е.

Для всіх досліджених на даному етапі роботи бетонів використовувався цемент СЕМ II/B-S 42.5 N виробництва Cementaren Ladce у кількості 300 кг/м³, кварцовий пісок та добавка суперпластифікатор карбокситатного типу Verament

НТ28 у кількості 1,2 % від маси цементу. Це аналогічно другій серії експериментів (№1с-№5с) попереднього третього етапу досліджень, описаному у 3-му розділі.

Більш детально характеристики вторинного щебеню з неоднорідним складом описано у розділі 2.3. Такий крупний заповнювач є максимально наближеним до масового вторинного щебеню, наявного на будівельному ринку. Також його можна вважати наближеним до неоднорідного щебеню, який отримується при переробці зруйнованих будинків і споруд.

Склади всіх досліджуваних на даному етапі роботи бетонів наведені у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Склади досліджених бетонів основи дорожнього одягу,
зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом

№	Цемент (тип, кг/м ³)	Крупний заповнювач (тип, кг/м ³)	Пісок (тип, кг/м ³)	Добавка (тип, кг/м ³)	Вода (л/м ³)	В/Ц
1е	СЕМ ІІ/В-S 42.5 N, 300	гранітний гравій, 1252	кварцовий, 762	Вермент НТ28, 3,6	124	0,413
2е		вторинний з з/б конструкцій, 1122			138	0,460
3е		вторинний з неоднорідним складом, 1102	кварцовий, 739		148	0,493

Для всіх досліджуваних на даному етапі роботи бетонів було визначено середню густину, міцність на стиск у віці 3х та 28ми діб, міцність на розтяг при згині у віці 28ми діб, водопоглинання, морозостійкість та ударостійкість. Отримані результати наведено в таблиці 4.2. Для складів №1е і №2е це визначення фізико-механічних характеристик фактично було перевірочним з врахуванням отриманих на попередньому етапі роботи даних.

Таблиця 4.2

Властивості бетонів основи дорожнього одягу,
зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом

№	Середня густина, кг/м ³	Водопоглинання, %	Міцність на стик у віці 3 діб, МПа	Міцність на стик у віці 28 діб, МПа	Міцність на розтяг при згині	Марка морозостійкості	Ударостійкість
1e	2462	6,1	27,87	48,70	3,49	F100	1,930
2e	2344	7,6	29,35	49,41	3,70	F100	1,980
3e	2281	7,9	25,20	49,18	3,59	F100	2,317

Як видно з даних таблиці 4.2 та діаграми на рис. 4.1, очікувано найбільшу середню густоту мають бетони «контрольних» складів на основі річкового гравію та кварцового піску. Бетони на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій мають на 5% нижчу густину. Бетони на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом мають вже на 7,5 % нижчу середню густину у порівнянні з «контрольним» складом, що пояснюється вищою пористістю заповнювача.

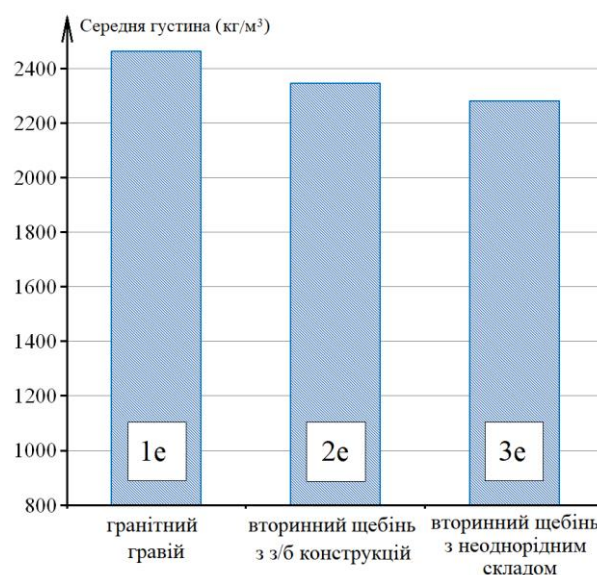


Рис. 4.1 Середня густина бетонів, зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом

Проте зниження густини не в повній мірі пропорційно відобразилось на

водопоглинани зразків. На діаграмі рис.4.2, яка відображають водопоглинання, видно, що для «контрольного» складу бетону №1е з найбільшою густиною водопоглинання складає – 6,1 %. Для бетону №2е водопоглинання склало 7,6%, а водопоглинання бетону №3е знаходиться майже на тому ж рівні – 7,9 %, хоч він і має меншу густину.

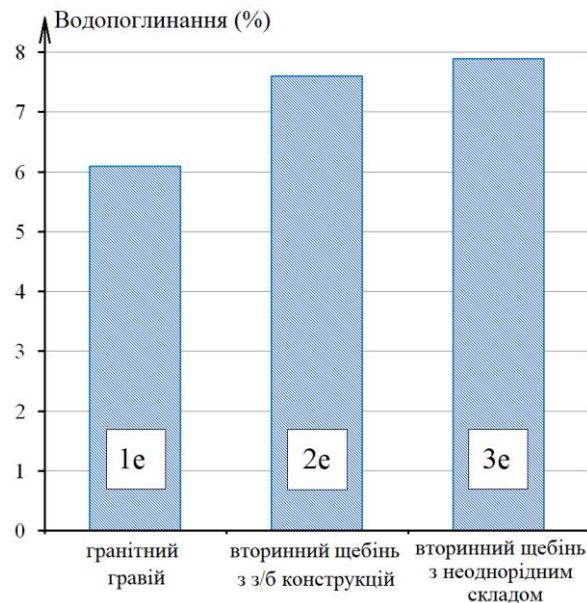


Рис. 4.2 Водопоглинання бетонів, зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом

Міцність досліджених бетонів на стиск у віці 3х та 28 діб відображена на діаграмах рис. 4.3. У віці 3х діб міцність «контрольного» складу бетону була 27,87 МПа, бетону на основі крупного заповнювача із залізобетонних конструкцій (2е) була на 5 % вищою, по аналогії із зразками із основної серії експерименту, а міцність бетону на основі щебеню з неоднорідним складом (3е) була нижчою на 9%, що пояснюється вищою пористістю заповнювача, що відобразилося на збільшенні В/Ц суміші, та нижчою міцністю на дробимість заповнювача. Проте у віці 28ми діб міцність на стиск бетону складу 2е була на 1,5% більшою, ніж у контрольного складу, а бетону 3е більшою на 1%. Тобто за результатами випробувань зразків бетонів даної серії, міцність на стиск у проектному віці бетону на основі щебеню з неоднорідним складом виявилась практично однаковою з міцністю бетону на основі однорідного щебеню з

залізобетонних конструкцій, та дещо більшою у порівнянні з бетоном на основі річкового гранітного гравію. Це пояснюється аналогічними причинами, що і у випадку застосування однорідного вторинного щебеню. По-перше, вторинний щебінь з неоднорідним складом також має більш шорстку поверхню, ніж гравій, що сприяє кращій адгезії з цементно-піщаною матрицею, а по-друге, він забезпечує кращі умови твердіння бетону у зв'язку з більшою пористістю, а відповідно більшим водо-насиченням крупного заповнювача.

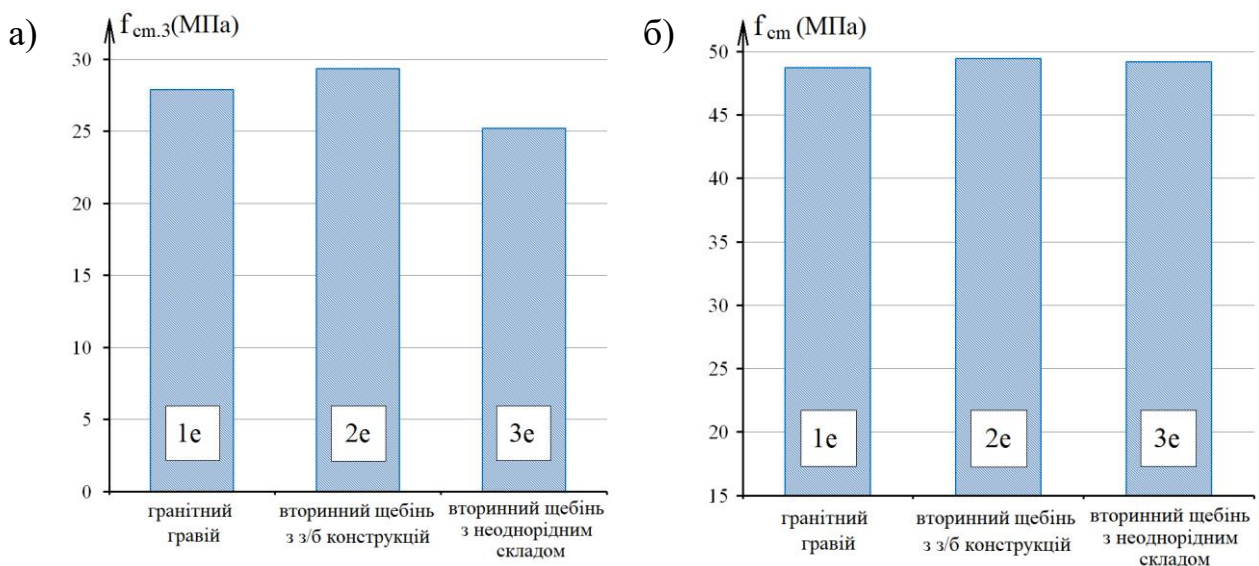


Рис. 4.3 Міцність бетонів, зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом, у віці 3-х діб (а) та 28-ми діб (б)

Бетони даної серії були випробувані на міцність на розтяг при згині у віці 28ми діб, результати наведені в таблиці 4.2 та на діаграмі на рис. 4.4. Міцність на розтяг бетонів на основі вторинного щебеню як з залізобетонних конструкцій так і на основі щебеню неоднорідного складу була на 3-6% вище за міцність бетону на основі річкового гравію. Це також пояснюється більш шорсткою формою вторинного заповнювача, яка сприяє кращій адгезії з цементно-піщаною матрицею бетону. Міцність на розтяг бетону на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій виявилась дещо більшою, що пояснюється одночасно гарним зчепленням з матрицею бетону та якістю та однорідністю сировини.

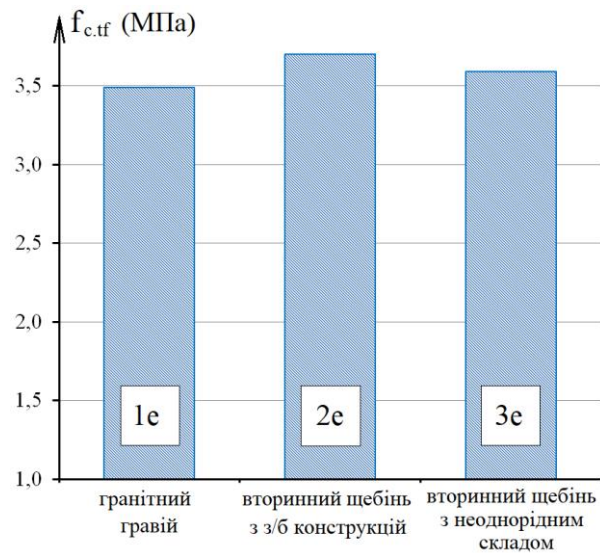


Рис. 4.4 Міцність на розтяг при згині бетонів, зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом

Результати випробування бетонів серії 1e-3e на морозостійкість показали, що всі типи досліджених на даному етапі роботи бетонів відповідають марці морозостійкості F100.

Для складу бетонів №1e-№3e також було визначено ударостійкість. Результати випробувань представлено в таблиці 4.2 та на діаграмі на рис. 4.5.

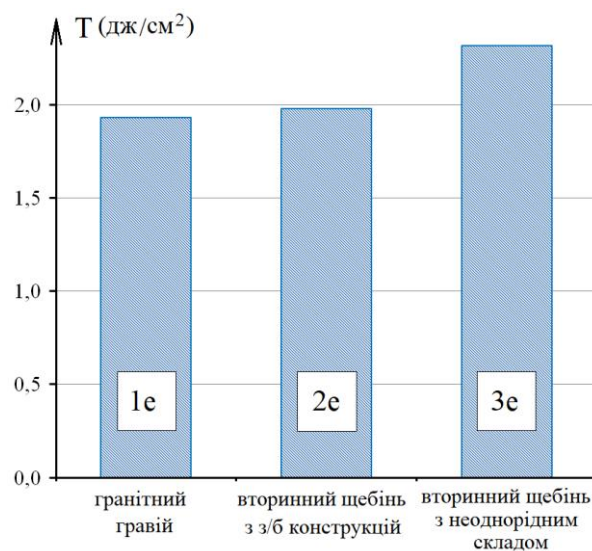


Рис. 4.5 Ударостійкість бетонів, зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом

Результати досліджень показують, що ударостійкість бетону, виготовленого

з вторинного щебеню з неоднорідним складом є на 20% вищою у порівнянні з «контрольним» складом бетону, виготовленого на основі річкового гравію. Це підтверджує достатню ефективність використання вторинного щебеню з неоднорідним складом для виготовлення бетонів для основ дорожнього одягу. Також такий бетон мав на 17% вищу ударостійкість у порівнянні з значенням T_u у бетону, виготовленого з вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій, який показував достатньо високий результат і при випробуванні на міцність на стиск і на розтяг. Висока ударостійкість бетону на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом в цілому є аналогічною з результатами попередньої серії експериментів, а саме з ударостійкістю бетонів на вторинному щебені з цегляної кладки і керамічної плитки. Оскільки вторинний щебінь з неоднорідним складом, за результатами оцінки аналітичної проби, на 9% складається з цегли та кераміки, бетони отримані з такого заповнювачу мають поліпшені властивості щодо розсіювання енергії динамічних впливів, що було встановлено в попередньому етапі досліджень.

В цілому результати досліджень властивостей бетонів на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом показали, що міцність таких бетонів на стиск і на розтяг при згині є вищою в порівнянні з бетоном на основі річкового гравію, а також майже не відрізняється від міцності бетонів на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій. Також бетон на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом має високу ударостійкість.

Тобто неоднорідність складу крупного вторинного заповнювача (при відсутності органічних домішок) не суттєво впливає на властивості бетонів. Це дозволяє використовувати такий заповнювач для бетону дорожнього одягу. Для кращого обґрунтування таких попередніх висновків слід провести додаткові дослідження бетонів з використанням вторинного щебеню неоднорідного складу з різних партій. Бажано проаналізувати ймовірну розбіжність показників міцності бетону залежно від варіативності та неоднорідності складу крупного заповнювача.

4.2 Дослідження впливу дисперсного армування поліпропіленою фіброю на властивості бетону на основі вторинних заповнювачів

В рамках даного **четвертого етапу** роботи також було досліджено властивості фібробетонів з поліпропіленою фіброю на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом. Відомо, що дисперсне армування потенційно є ефективним методом покращення міцності та довговічності бетонів дорожніх покриттів [13, 65, 66]. Проте ефективність використання такого технологічного прийому в бетонах на вторинних заповнювачах потребує додаткових досліджень.

На даному етапі роботи у якості дисперсної арматури використовувалася поліпропіленова фібра EGIBI PP 32 мкм/12 мм.

Така серія бетонів маркувалась 1f – 4f. Для повноцінного порівняння властивостей бетону було виготовлено зразки «контрольного» складу на основі гранітного гравію та кварцового піску без додавання фібри (№ 1f, фактично використано зразки бетону серії № 1e) та зразки с аналогічним складом заповнювачів та дисперсним армуванням поліпропіленою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм у кількості 0,9 кг/м³ відповідно до рекомендацій виробника (№ 2f). Для визначення впливу фібри на властивості бетонів саме на основі вторинних заповнювачів було виготовлено бетони з вторинного щебеню неоднорідного складу та кварцового піску без фібри (№ 3f, фактично використано зразки бетону серії № 3e) та з поліпропіленою фіброю (№ 4f).

Для всіх типів бетонів даної серії використовувався цемент СЕМ II/B-S 42.5 N виробництва Cementaren Ladce, Словаччина, у кількості 300 кг/м³ та добавка суперпластифікатор карбокситатного типу Verament HT28 у кількості 1,2 % від маси цементу. Склади вищезазначених бетонів представлено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Склади досліджених бетонів, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм

№	Цемент (тип, кг/м ³)	Крупний заповнювач (тип, кг/м ³)	Пісок (тип, кг/м ³)	Фібра (тип, кг/м ³)	Добавка (тип, кг/м ³)	Вода (л/м ³)	В/Ц
1f	СЕМ П/В-S 42.5 N, 300	гранітний гравій, 1252	кварцовий, 762	-	Berament HT28, 3,6	124	0,413
2f			кварцовий, 761	Полімерна 32 мкм/12 мм, 0,9		124	0,413
3f		вторинний з неоднорідним складом, 1102	кварцовий, 739	-		148	0,493
4f			кварцовий, 738	Полімерна 32 мкм/12 мм, 0,9		150	0,500

Для всіх досліджених типів бетонів було визначено середню густину, міцність на стиск у віці 3х та 28ми діб, міцність на розтяг у віці 28ми діб, водопоглинання, морозостійкість та ударостійкість. Отримані результати наведено в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Властивості бетонів основи дорожнього одягу, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм

№	Середня густина, кг/м ³	Водопо- глинан- ня, %	Міцність на стик у віці 3 діб, МПа	Міцність на стик у віці 28 діб, МПа	Міцність на розтяг при згині	Марка морозо- стійкості	Ударо- стій- кість
1f	2462	6,1	27,87	48,70	3,49	F100	1,930
2f	2420	6,0	26,32	52,12	3,83	F100	2,155
3f	2281	7,9	25,20	49,18	3,59	F100	2,317
4f	2275	7,7	25,11	51,09	3,67	F100	2,385

Як видно з наведених у таблиці 4.4 даних та побудованих за ними діаграм на рис. 4.6 і рис. 4.7, бетони з дисперсним армуванням поліпропіленою фіброю мають на 1-2 % меншу середню густину у порівнянні з бетонами без фібри. Проте

водопоглинання фібробетонів є не вищим, ніж бетонів аналогічних складів (на аналогічному типі щебеню).

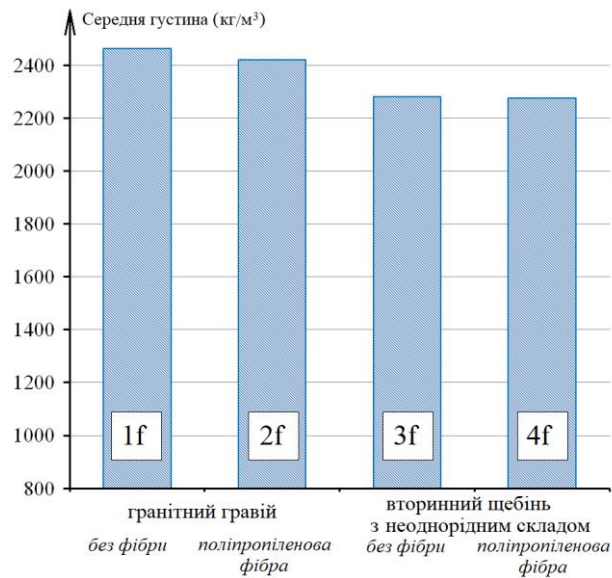


Рис. 4.6 Середня густина бетонів, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм

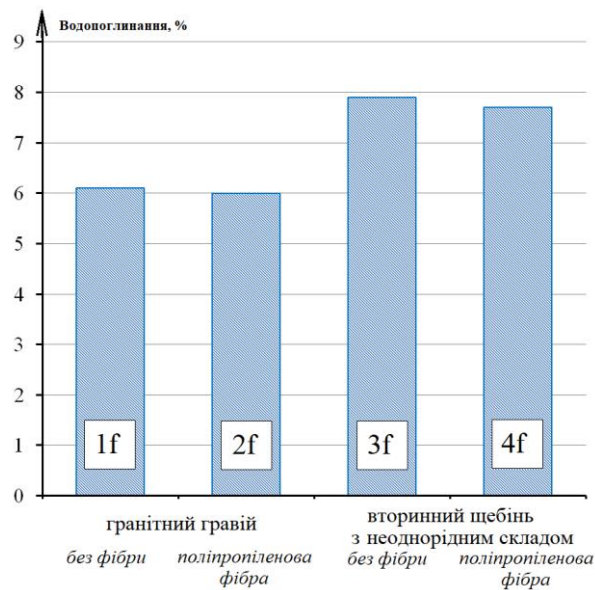


Рис. 4.7 Водопоглинання бетонів, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм

Міцність досліджених бетонів і фібробетонів на стиск у віці 3х та 28 діб відображена на діаграмах рис. 4.8. Їх аналіз показує, що у ранньому віці дисперсноармовані бетони мають міцність на стиск, яка є не вищою міцності

аналогічних бетонів без фібри. У проектному 28 денному віці за рахунок дисперсного армування міцність на стиск бетону «контрольного» складу зростає на 7%, а міцність бетону на вторинному щебені неоднорідного складу лише на 3%. Тобто ефективність використання поліпропіленової фібри EGIBI PP 32 мкм/12 мм в бетоні на вторинних заповнювачах була нижчою.

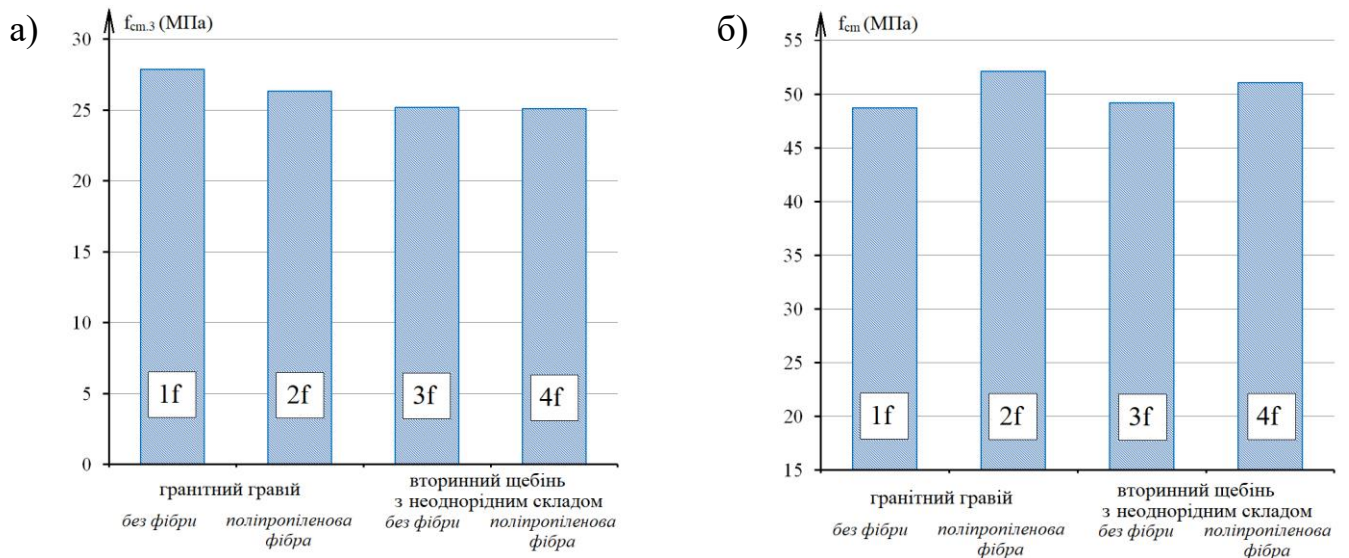


Рис. 4.8 Міцність на стиск бетонів, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленовою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм у віці 3-х діб (а) та 28-ми діб (б)

Аналогічний висновок можна зробити щодо ефективності використання фібри з позиції її впливу на величину розтягу при згині досліджених бетонів (рис.4.9). За рахунок дисперсного армування міцність на розтяг при згині бетонів «контрольного» складу на основі річкового гравію зросла на 9,7 %, а для бетонів на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом – на 2,2 %, що знаходиться близько до межі точності експерименту.

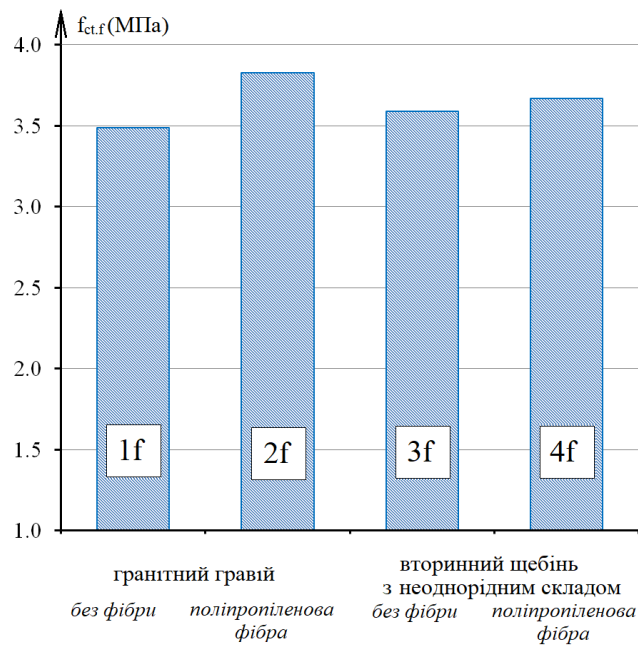


Рис. 4.9 Міцність на розтяг при згині бетонів, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленовою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм

Різниця в ефективності дисперсного армування для бетонів на основі щільних природних і вторинних заповнювачів обумовлюється тим, що менш міцні та більш пористі вторинні заповнювачі викликають защемлення волокна фібри у матриці композиційного матеріалу, що знижує їх ефективність [144, 145].

В результаті визначення морозостійкості досліджених бетонів і фібробетонів серії 1f-4f встановлено, що всі склади відповідають марці морозостійкості F100. Це означає, що дисперсне армування не вплинуло на морозостійкість даних бетонів настільки, щоб змінити її рівень при визначенні F прискореним методом.

Результати визначення ударостійкості бетонів і фібробетонів серії 1f-4f відображені на наведеній на рис. 4.10 діаграмі.

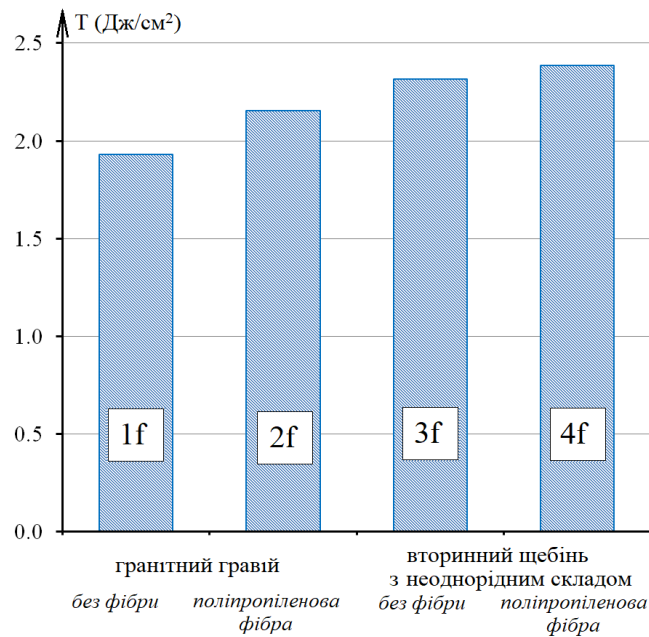


Рис. 4.10 Ударостійкість бетонів, зокрема з дисперсним армуванням поліпропіленовою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм

Результатами експерименту показують, що дисперсне армування поліпропіленовою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм позитивно впливає на ударостійкість. Але ударостійкість бетону «контрольного» складу на основі річкового гравію зросла при введенні даної фібри на 12%. А ударостійкість бетонів на основі вторинного щебеню з неоднорідним складом зросла лише на 3%. Це свідчить про недостатню ефективність поліпропіленової фібри EGIBI PP 32 мкм/12 мм для збільшення здатності бетону опиратися ударним впливам. Використання дисперсного армування у бетонах на вторинному щебені з неоднорідним складом ще менш ефективно через поліпшену здатність такого крупного заповнювача розсіювати енергію динамічних впливів.

В цілому аналіз результатів даного експерименту дозволяє зробити висновок, що використання дисперсного армування поліпропіленовою фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм при виготовленні бетонів на основі вторинних заповнювачів для дорожнього будівництва не є ефективним. Ступень впливу такого технологічного прийому на міцність, морозостійкість і ударостійкість бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом є мінімальним. При

цьому собівартість бетонів зростає за рахунок вартості самої фібри та додаткової технологічної операції при виготовленні бетонної суміші.

Враховуючи отриману під час досліджень інформацію, було запропоновано експеримент з використання фібри інших типів та розмірів для виготовлення фібробетонів на основі вторинних заповнювачів. Результати даного дослідження наведено нижче.

4.3 Дослідження властивостей бетонів і фібробетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементу з високим вмістом шлаку

З врахуванням результатів попередніх етапів роботи, зокрема дослідження властивостей бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом, на наступному етапі роботи було досліджено властивості бетонів і фібробетонів з різними типами фібрами на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементі з високим вмістом шлаку.

Такий вибір цементу був обумовлений необхідністю максимального використання вторинних ресурсів, зокрема відходів металургійного виробництва. Високі показники міцності досліджених на попередніх етапах роботи бетонів на вторинних заповнювачах, зокрема на вторинному щебені з неоднорідним складом, показують можливість застосування цементів з меншою активністю.

В експерименті порівнювалися властивості бетонів і фібробетонів на природних і вторинних заповнювачах.

Для виготовлення бетонів і фібробетонів використовувався два типи крупного заповнювача фракції 8-16 мм (ДСТУ Б EN 12620:2013 [146]):

- гранітний річковий гравій, добутий у словацькій частині річки Дунай і аналогічних попереднім етапам дослідження. Насипна густина гравію 1570 кг/м³, водопоглинання 0,70 %. Був обраний як один з наймасовіших типів заповнювача у центральній Європі;

- вторинний щебінь з неоднорідним складом. Детальний зерновий склад

цього заповнювача представлено у підрозділі 2.3. Щебінь є аналогічним тому, що використовувався у наведених вище дослідженнях.

У якості дрібного заповнювача використовувалися два типи пісків фракції 0-4 мм [146]:

- кварцовий. Модуль крупності піску 3,19, насипна густина 1850 кг/м³;
- вторинний з перероблених залізобетонних конструкцій. Модуль крупності даного піску 3,83, насипна густина 1500 кг/м³.

Для всіх досліджених на даному етапі роботи бетонів у якості в'язучого використовувався шлакопортландцемент СЕМ III/A з вмістом шлаку доменних печей в розмірі 65 % виробництва CRH Cement Multicem, Німеччина у кількості 300 кг/м³ та добавка суперпластифікатор полікарбосилатного типу Soudal Soudaplast виробництва чеської фірми Soudal у кількості 1,2 % від маси цементу.

Для даної серії бетонів використовувалося два типи фібри у якості дисперсного армування:

- поліпропіленова фібра BeneSteel 55 (довжина волокон 55 мм, еквівалентний діаметр 0,48 мм, виробник SKLOCEMENT BENES, Чехія, міцність на розрив відповідно EN 14889-2 складає 610 МПа);
- фібра з лугостійкого скла ANTI-CRAK HP 12 (довжина волокон 12 мм, еквівалентний діаметр волокон 0,2-0,5 мм, виробник Owens Corning, США, міцність на розрив 1000-1700 МПа).

Було розроблено три серії бетонів, відповідно без фібри (1g–3g), з фіброю ANTI-CRAK HP 12 у кількості 1 кг/м³ (1h–3h) та з фіброю BeneSteel 55 у кількості 4 кг/м³ (1i–3i). Кількість фібри була обрана відповідно до рекомендацій виробників та результатів попередніх експериментів. У кожній серії досліджено: бетон на основі гранітного гравію та кварцового піску в якості контрольного (1g, 1h, 1i), бетон з використанням вторинного щебеню неоднорідного складу і кварцового піску (2g, 2h, 2i) та бетон з використанням вторинного щебеню неоднорідного складу і вторинного піску (3g, 3h, 3i). Рухомість всіх сумішей була рівною S1, при ОК=1..2 см. Така рухомість відповідає вимогам ДБН В.2.3-4:2015 [137]. Кількість води відповідно корегувалася в залежності від складу бетонної

суміші. Склади досліджених бетонів і фібробетонів основи дорожнього одягу наведені у таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

Склади досліджених бетонів і фібробетонів основи дорожнього одягу

№	Цемент (кг/м ³)	Крупний заповнювач (тип, кг/м ³)	Пісок (тип, кг/м ³)	Добавка (кг/м ³)	Фібра (тип, кг/м ³)	Вода (л/м ³)	В/Ц
Перша серія експерименту							
1g	300	гранітний гравій, 1252	кварцовий, 752	3,6	-	129	0,430
2g		вторинний, 1102				166	0,553
3g		вторинний, 1050	вторинний, 744			190	0,633
Друга серія експерименту							
1h	300	гранітний гравій, 1252	кварцовий, 740	3,6	Anti-Crak HP 12, 1,0	137	0,457
2h		вторинний, 1102				175	0,583
3h		вторинний, 1050	вторинний, 722			203	0,677
Третя серія експерименту							
1i	300	гранітний гравій, 1232	кварцовий, 737	3,6	BeneSteel 55, 4,0	149	0,497
2i		вторинний, 1092				185	0,617
3i		вторинний, 1030	вторинний, 719			210	0,700

Як видно з таблиці 4.5, завдяки застосуванню різних типів заповнювачів водопотреба і відповідно В/Ц бетонних сумішей суттєво відрізнялася. Також на В/Ц сумішей впливала наявність і тип дисперсної арматури. На рис. 4.11 показана побудована за даними таблиці 4.5 діаграма, яка відображає вплив типу заповнювача і фібри на В/Ц сумішей рівної рухомості.

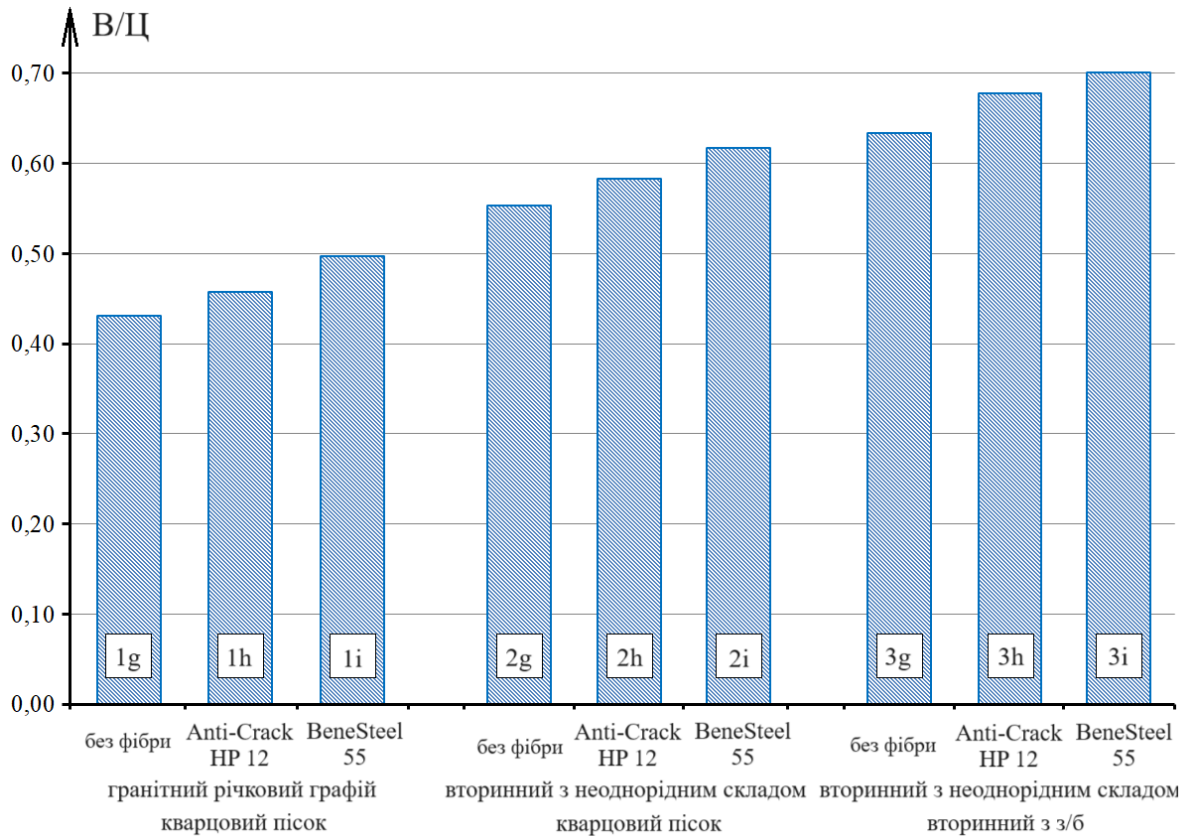


Рис. 4.11 Вплив типу заповнювачів і фібри на В/Ц бетонних сумішей

Аналіз діаграми дозволяє сказати, що бетони і фібробетони на гранітному гравії та кварцовому піску очікувано мають найнижче В/Ц. При використанні вторинного щебеню з неоднорідним складом завдяки водопоглинанню заповнювача В/Ц сумішей зростає. При використанні вторинного щебеню одночасно з вторинним піском В/Ц зростає до ще більш високого рівня – 0,633-0,7. Проте можна відзначити, що більшість додаткової води в даних бетонних сумішах буде адсорбована пористим заповнювачем. Відповідно підвищення В/Ц в даному випадку відіграє подвійну роль. З одного боку, підвищується вміст вільної води, що впливає на пористість затверділого бетону, з іншого боку покращуються умови твердіння матеріалу і адгезія цементно-піщаної матриці до заповнювача [147].

Для бетонів на всіх типах заповнювачів при використанні фібри Anti-Crak HP 12 (у кількості 1 кг/м³) В/Ц сумішей рівної рухомості зростає на 5,5-6,9 %. При використанні фібри BeneSteel 55 (у кількості 4 кг/м³) В/Ц сумішей

підвищується на 10,6-15,5 % у порівнянні з сумішами без дисперсної арматури. Тобто не зважаючи на більший діаметр і довжину завдяки більш високому дозуванню фібра VeneSteel 55 вимагає використання більшої кількості води для забезпечення необхідної рухомості суміші.

Для всіх досліджених бетонів і фібробетонів була визначена їх середня густина, міцність на стиск і міцність на розтяг при згині (таблиця 4.6).

Таблиця 4.6

Фізико-механічні характеристики досліджених бетонів і фібробетонів

№	Середня густина (кг/м ³)	Міцність на стиск (МПа)	Міцність на розтяг при згині (МПа)
1g	2346	28,1	3,12
2g	2258	29,2	3,18
3g	2224	27,8	2,78
1h	2339	29,8	3,41
2h	2230	32,7	3,29
3h	2179	28,9	2,78
1i	2331	27,4	2,93
2i	2226	29,0	3,04
3i	2132	26,3	2,65

На рис. 4.12 показано побудовану за даними таблиці 4.6 діаграму, яка відображає вплив типу заповнювачів і фібри на середню густину досліджених бетонів для основ дорожнього одягу.

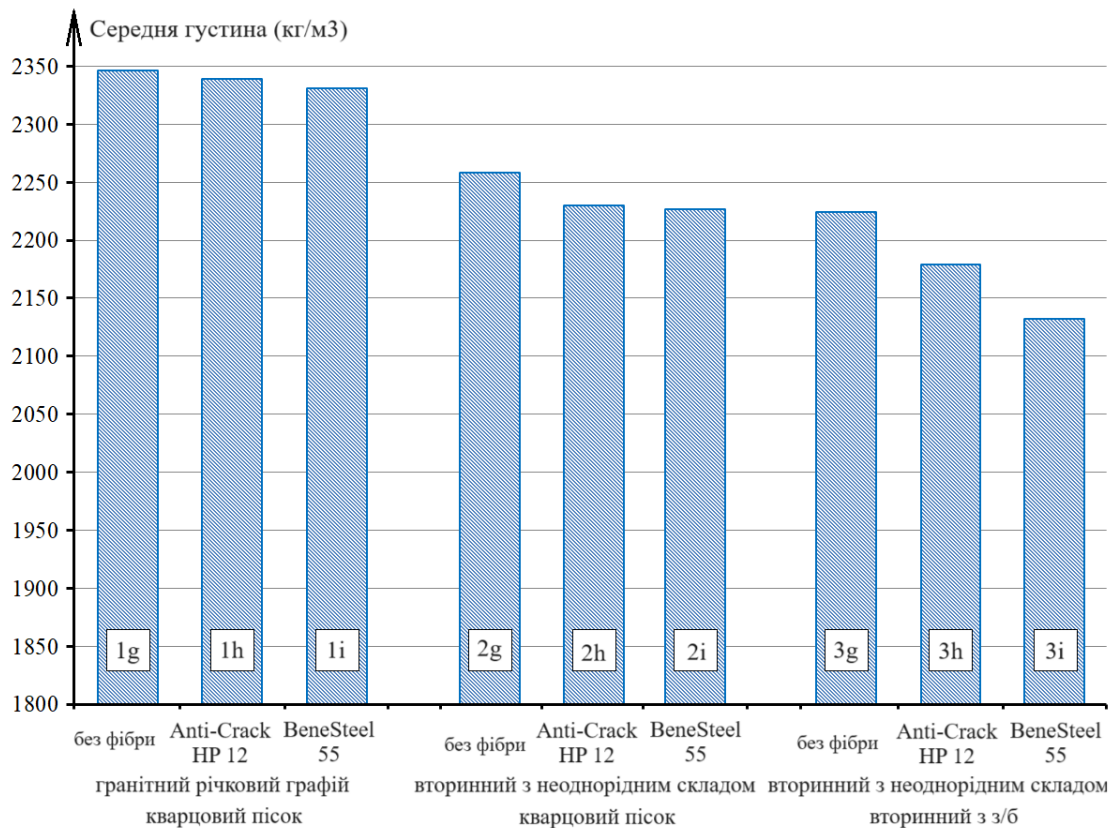


Рис. 4.12 Вплив типу заповнювачів і фібри на середню густина бетонів

Як видно з діаграми, на середню густина досліджених бетонів впливає переважно тип заповнювача. Бетони і фібробетони на гранітному гравії та кварцовому піску мають найбільшу густина. Бетони на вторинному щебені з неоднорідним складом та кварцовому піску мають на 3,8-4,6 % меншу середню густина. При використанні вторинного щебеню одночасно зі вторинним піском середня густина бетону є на 5,2-8,5 % меншою в порівнянні з бетонами на гранітному гравії. При застосуванні дисперсної арматури завдяки підвищенню В/Ц суміші середня густина бетонів на всіх типах заповнювача знижується – до 2% при використанні фібри Anti-Crack HP 12 і до 4,1% при використанні фібри BeneSteel 55.

Проте на міцність досліджених бетонів тип заповнювачів і фібри оказували інший вплив, ніж на середню густина матеріалу. Міцність на стиск досліджених бетонів і фібробетонів для основ дорожнього одягу відображена на діаграмі на рис. 4.13.

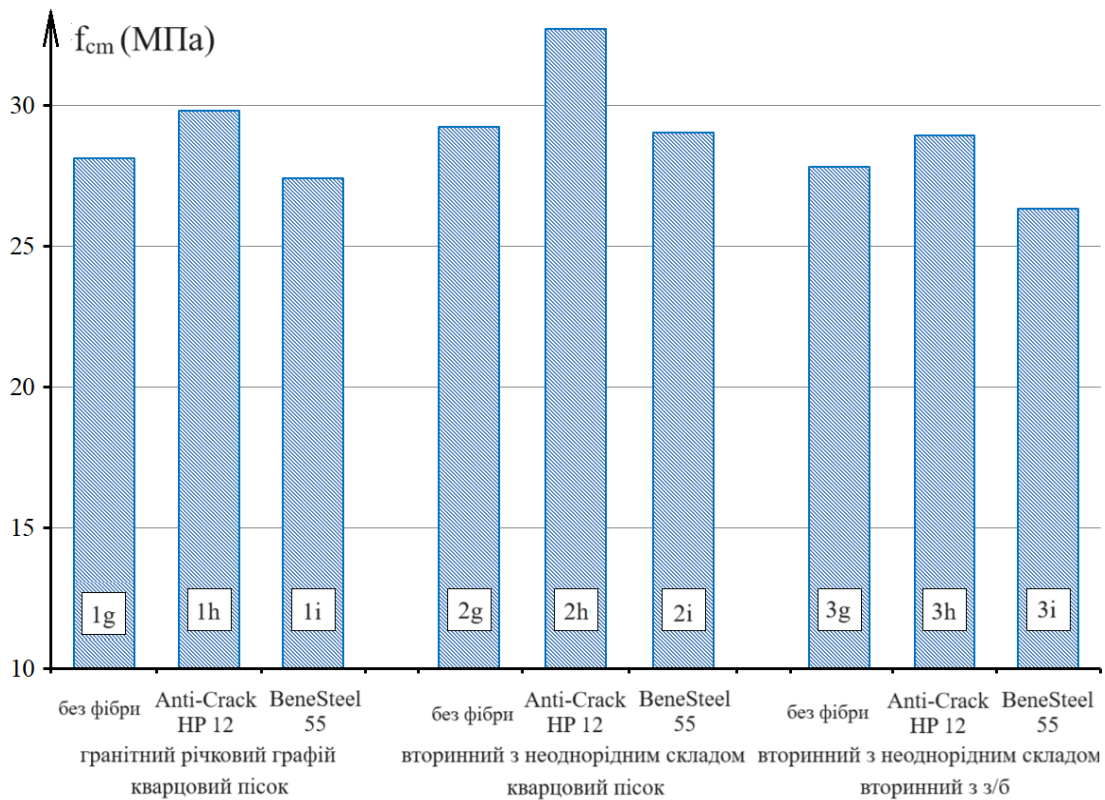


Рис. 4.13 Вплив типу заповнювачів і фібри на міцність бетонів на стиск

Аналіз діаграми і даних таблиці 4.6 показує, що міцність бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом та кварцовому піску була на 1,1-2,9 МПа (3,9-9,7 %) вище міцності бетонів на гранітному гравії та аналогічному піску. Це пояснюється тим, що гравій має гіршу адгезію до цементно-піщаної матриці, між щебінь не обкатаної форми [139]. Крім того, як відмічалось вище, вторинний щебінь завдяки власній пористості забезпечує додаткове підвищення адгезії з матрицею та покращує умови твердіння бетону завдяки «внутрішньому догляду» [147, 139]. Підтвердженням такої структуроутворюючої ролі пористого заповнювача також є те, що бетони на вторинному щебені та вторинному піску мали міцність на стиск лише на 0,3-1,1 % нижче, ніж бетони на гранітному гравії та кварцовому піску.

Дисперсне армування фіброю Anti-Crack HP 12 оказує позитивний вплив на міцність на стиск бетонів на всіх типах заповнювача, навіть не зважаючи на невелике збільшення В/Ц суміші. Міцність бетонів з таким типом фібри є на 4,0-11,8 % більшою за міцність не армованих бетонів на аналогічних заповнювачах.

Проте використання фібри BeneSteel 55 було не ефективним. Бетони, дисперсно-армовані таким типом фібри, показали на 0,7-5,4 % нижчу міцність, ніж аналогічні бетонів без фібри. Тобто вплив суттєвого підвищення В/Ц суміші, яке було необхідним при використанні даного типу фібри, не був компенсований впливом дисперсної арматури на здатність перерозподіляти навантаження на структуру бетону.

Як визначалося вище, основною вимогою до бетонів для основ дорожнього одягу є їх міцність на розтяг при згині [39]. Це обумовлено навантаженнями, які діють на конструкції доріг. На рис. 4.14 показано діаграму, яка відображає вплив типу заповнювачів і фібри на міцність на розтяг при згині досліджених бетонів.

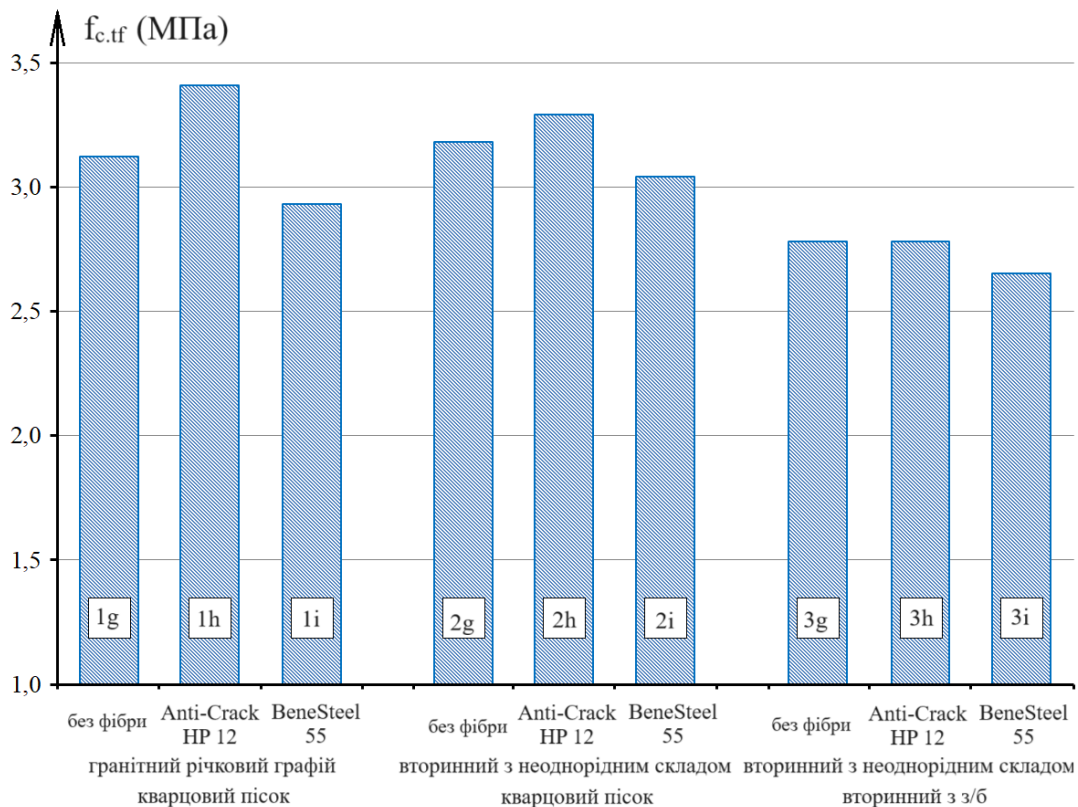


Рис. 4.14 Вплив типу заповнювачів і фібри на міцність бетонів на розтяг при згині

Аналіз діаграми і даних таблиці 4.6 показує, що бетон без дисперсного армування на вторинному щебені з неоднорідним складом та кварцовому піску (2g) мав міцність на розтяг, аналогічну з бетоном на гранітному гравії (1g).

Визначена міцність складу 2g була навіть на 2 % вище міцності складу 1g. При використанні одночасно крупного і дрібного вторинних заповнювачів (3g) міцність на розтяг при згині бетону є лише на 10,8 % меншою за міцність «базового» складу 1g. Тобто бетони на вторинних заповнювачах характеризуються достатньо високою міцністю на розтяг при згині. Це також обумовлено насамперед високою адгезією заповнювача до піщано-цементної матриці, що підвищує стійкість до дії напружень розтягування [147].

Проте ефективність дисперсного армування в бетонах на вторинних заповнювачах з позиції підвищення міцності на розтяг була низькою. При застосуванні фібри Anti-Crak HP 12 міцність на розтяг при згині бетону на гранітному гравії та кварцовому піску зростає на 9,3 %. Аналогічне дисперсне армування бетону на вторинному щебені та кварцовому піску підвищує його міцність на розтяг лише на 3,5%, що знаходиться в межах точності експерименту. Для бетонів на вторинному щебені та вторинному піску армування фіброю Anti-Crak HP 12 зовсім не вплинуло на рівень міцності на розтяг.

Така різниця в ефективності дисперсного армування для бетонів на основі природних і вторинних заповнювачів, як було вже сказано вище, може бути пояснена їх різною структурою. Більш пористі вторинні заповнювачі забезпечують відносно високу міцність на розтяг при згині. Проте їх власна міцність є меншою за міцність природних заповнювачів (граніту і кварцового піску). Відповідно вторинні заповнювачі можуть гірше защемляти волокна фібри, що впливає на їх роботу в композиційному матеріалі.

З позиції впливу на міцність на розтяг при згині використання фібри BeneSteel 55 в досліджених бетонах не було ефективним, також як з позиції впливу на міцність при стиску.

Таким чином, досліджені бетони на вторинному щебені з неоднорідним складом, включаючи бетони на вторинному піску, мають міцність на стиск від 26,3 до 32,7 МПа і міцність на розтяг при згині від 2,65 до 3,29 МПа. Тобто міцність отриманих у лабораторних умовах бетонів на вторинних заповнювачах і з використанням цементу з високим вмістом шлаку є 50-100 % вище рівня

мінімальних вимог, щодо міцності бетонів для монолітної основи згідно ДБН В.2.3-4:2015 [137] і ГБН В.2.3-37641918-557:2016 [39]. Це підтверджує перспективу ефективного використання даних бетонів в основах дорожнього одягу, навіть з врахуванням гіршої якості подібних бетонів при їх промисловому виготовленні.

Також дослідження показали недоцільність застосування в бетонах на вторинному щебені з неоднорідним складом дисперсного армування, використаними в даних дослідженнях типами фібри. Введення фібри не викликало відчутного покращення міцності бетону. В врахуванням економічного чинника не можна рекомендувати застосування такого типу дисперсного армування.

4.4 Впровадження результатів досліджень

Результатів даних дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес та у виробництво.

В Одеській державній академії будівництва та архітектури окремі наукові результати даної роботи використовувалися при підготовці магістрів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми», а саме у методичних матеріалах освітніх компонентів «Ресурсозбереження та новітні технології у будівництві автомобільних доріг та аеродромів» і «Сучасні будівельні матеріали».

Також результати досліджень використовувалися при підготовці магістерських дипломних робіт за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми» спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Довідка про впровадження результатів роботи в навчальний процес наведена у Додатку Б.

Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» результати дисертаційних досліджень були

використані при влаштуванні бетонних основ дорожнього одягу поїзду до мосту на автомобільній дорозі загального користування державного значення Т-24-03 Отрадівка – Христинівка – Жашків – Корсунь-Шевченківський – Мошни, км 163+000, який розташований у с. Шендерівка Корсунь-Шевченківського району Черкаської області. Використовувалася технічна інформація щодо можливості використання вторинного щебеню і надані рекомендовані склади бетонів з вторинним щебенем.

Довідка про впровадження результатів роботи ДП «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» наведена у Додатку Б.

Висновки за 4-м розділом

1. Доведена доцільність використання вторинного щебеню з неоднорідним складом для виготовлення бетонів для основ дорожнього одягу. Встановлено, що міцність на стиск і на розтяг при згині бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом є вищою в порівнянні з бетоном на основі річкового гравію, а також майже не відрізняється від міцності бетонів на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій.

2. Визначено вплив поліпропіленової фібри EGIBI PP 32 мкм/12 мм у якості дисперсного армуючого матеріалу для виготовлення бетонів основ дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів. Встановлено низьку ефективність дисперсного армування фіброю EGIBI PP 32 мкм/12 мм для виготовлення бетонів на основі вторинних заповнювачів, враховуючи вплив на характеристики бетону та економічний фактор.

3. Доведена можливість використання для основ дорожнього одягу бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементі з високим вмістом шлаку. Таки матеріали, включаючи бетони на вторинному піску, мають міцність на стиск від 26,3 до 32,7 МПа, міцність на розтяг при згині від 2,65 до 3,29 МПа і морозостійкість F100. Це на 50-100% вище рівня мінімальних вимог, щодо міцності і морозостійкості бетонів для монолітної основи згідно ДБН В.2.3-

4:2015. Також бетони на вторинному щебені з неоднорідним складом мають високу ударостійкість.

4. Встановлено, що дисперсне армування фіброю з лугостійкого скла ANTI-CRAK HP 12 підвищує міцність на стик бетонів основ дорожнього одягу на 4,0-11,8%. При цьому міцність на розтяг при згині бетону на гранітному гравії та кварцовому піску зростає на 9,3%, а бетону на вторинному щебені лише на 3,5%. Використання поліпропіленової фібри BeneSteel 55 викликало зниження міцності бетонів, що обумовлене необхідністю суттєвого збільшенні В/Ц при використанні даної фібри. Це показує недоцільність застосування в бетонах на вторинному щебені з неоднорідним складом дисперсного армування використаними в даних дослідженнях типами фібри з врахуванням економічного чинника.

5. Результати даних дисертаційних досліджень впроваджено в навчальний процес в Одеській державній академії будівництва та архітектури та у виробництво Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»» при влаштуванні бетонних основ дорожнього одягу під'їзду до мосту у с. Шендерівка Корсунь-Шевченківського району Черкаської області на автомобільній дорозі державного значення Т-24-03.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Розроблено склади бетонів основ дорожнього одягу з забезпеченою міцністю та довговічністю при максимальному використанні вторинних заповнювачів: вторинного щебеню і піску з залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню і піску з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки, вторинного щебеню з неоднорідним складом.

2. Проведено оцінку позитивного впливу на навколишнє середовище використання продуктів демонтажу будівель та споруд в рамках їх життєвого циклу, а також ефективності основних технологій виробництва вторинних заповнювачів з відходів демонтажу.

3. Порівняна ефективність застосування пластифікаторів різного типу в бетонах основ автомобільних доріг на вторинному щебені. Визначено, що суперпластифікатори полікарбоксилатного типу найбільш ефективно знижують водопотребу бетонних сумішей при використанні вторинних заповнювачів.

4. Досліджено властивості бетонів з різними типами крупного заповнювача (річкового гравію, вторинного щебеню з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного щебеню з переробленої цегляної кладки та керамічної плитки) та піску (кварцового, вторинного з перероблених залізобетонних конструкцій, вторинного з переробленої цегляної кладки). Встановлено, що бетони на вторинних заповнювачах мають міцність на розтяг при згині від 2,82 до 3,84 МПа, морозостійкість F100 та підвищену ударостійкість. Міцність та морозостійкість отриманих у лабораторних умовах бетонів на вторинних заповнювачах є приблизно вдвічі вище за вимоги ДБН В.2.3-4:2015 для монолітної основи автомобільних доріг.

5. Доведена можливість використання вторинного щебеню з неоднорідним складом для виготовлення бетонів для основ дорожнього одягу. Встановлено, що міцність на стиск і на розтяг при згині бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом є вищою в порівнянні з бетоном на основі річкового

гравію майже не відрізняється від міцності бетонів на основі вторинного щебеню з залізобетонних конструкцій.

6. Показана ефективність використання для основ дорожнього одягу бетонів на вторинному щебені з неоднорідним складом і цементі з високим вмістом шлаку. Таки бетони, включаючи склади на вторинному піску, мають міцність на стиск від 26,3 до 32,7 МПа, міцність на розтяг при згині від 2,65 до 3,29 МПа і морозостійкість F100, що на 50-100% вище рівня мінімальних вимог для монолітної основи згідно ДБН В.2.3-4:2015.

7. Встановлена недоцільність застосування в бетонах на вторинному щебені з неоднорідним складом дисперсного армування поліпропіленовими фібрами EGIBI PP 32 мкм/12 мм і BeneSteel 55, а також фіброю з лугостійкого скла ANTI-CRAK HP 12 з врахуванням мінімального впливу таких типів дисперсної арматури на міцність бетонів та економічного чинника.

8. Результати досліджень впроваджено у виробництві Дочірнім підприємством «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України»». Також результати досліджень використовуються в освітньому процесі Одеської державної академії будівництва та архітектури при підготовці магістрів спеціальності 192 за освітньою програмою «Автомобільні дороги та аеродроми».

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. C. A. Ighodaro. Transport infrastructure and economic growth in Nigeria. *J. Res. Natl. Dev.* 2009. Vol. 7 (2). P. 42–46.
2. Busari Ayobami, Oluwajana Seun, Ede Anthony, Joshua Opeyemi, Adeyanju Emmanuel. The spatio-temporal commuting pattern of the university environment: a Gender Perspective. *WIT Conference: Sustainable development and Planning 2018.* 2018. Vol. 217. P. 745–753.
3. A. Busari, O. Osuolale, D. Omole, S. Ojo, B. Jayeola. Travel behaviour of university environment: inter-relationship between trip distance and travel mode choice in south-western Nigeria. *Int. J. Appl. Eng. Res.* 2015. Vol. 10 (21). 42362–42366.
4. C. H. Aginam, C. A. Chidolue, C. Nwakire. Investigating the effects of coarse aggregate types on the compressive strength of concrete. *Int. J. Eng. Res.* 2013. Appl.3 (4). P. 114–124.
5. S. A. Oloyede. Tackling causes of frequent building collapse in Nigeria. *J. Sustainable Dev.* 2010. Vol. 7 (3). P. 127–132.
6. A. Busari, I. Akinwumi, P. Awoyera, O. Olofinnade, T. Tenebe, J. Nwachukwu. Stabilization effect of aluminum dross on tropical lateritic soil. *J. Eng. Res. Afr.* 2018.
7. A. Busari Ayobami, O. Akinmusuru Joseph, I. Dahunsi Bamidele. Review of sustainability in self compacting concrete: the use of waste and mineral additives as supplementary cementitious material and aggregate. *Portug. Electrochim. Acta.* ISI Thompson Reuters (With Impact Factor). 2018.
8. A. Busari, J. Akinmusuru, B. Dahunsi, T. Ofuyatan, B. Ngene. Pavement construction using self-compacting concrete: mechanical properties. *International Journal of Advanced and Applied Sciences.* 2017. Vol. 4 (8). P. 50–55.
9. James D. Grove, Sanford P. Lahue. Portland cement concrete pavement construction. *Integrated materials and construction practices for concrete pavements.* 2000. <http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/millennium/00092.pdf>
10. Carlos Jofre, Rafael Fernandez, Carlos Kraemer. Concrete pavement construction in Spain. *Transportation research record.* 1988. 1182. P. 18–25.

11. Веб-сайт видання Jnews. Долгосрочно и экономно: в Ахалкалаки строят железобетонные дороги. URL: <https://jnews.ge/?p=66364> (дата звернення 08.01.2024).

12. Веб-сайт компанії IRD ENGINEERING. Новый контракт подписан в Грузии: IRD Engineering будет осуществлять надзор за работами во время строительства нескольких участков международной дороги Тбилиси – Сагареджо. URL: <http://surl.li/pagig> (дата звернення 08.01.2024).

13. Andriy Mishutin, Zeljko Kos, Iryna Grynova, Lucia Chintea. Durability of modified fiber concrete for rigid pavements. *Croatian Regional Development Journal*. 2021. Vol. 2, № 1. P. 30–40.

14. Онищенко А. М., Гаркуша М. В., Давиденко О. О., Цепелев С. Ю., Федоренко О. В. Перспективи застосування цементобетонного покриття на транспортних спорудах. *Збірник наукових праць «Дороги і мости»*. 2021. Випуск 23. С. 178–196.

15. Iqrar Hussain, Babar Ali, Tauqeer Akhtar, Muhhamad Sohail Jameel, Syed Safdar Raza. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass and polypropylene). *Case studies in construction materials*. 2020. P. 1–10.

16. Zainab A. Al-Kaissi, Ahmed Saheb Daib, Rusul Raed Abdull-Hussain. Experimental and numerical analysis of steel fiber reinforced concrete pavement. *Journal of engineering and sustainable development*. 2016. Vol. 20. P. 135–155.

17. Eva Azhra Latifa, Robby Aguswari, Puspito Hadi Wardoyo. Performance of steel fiber concrete as rigid pavement. *Advanced materials and research*. 2013. Vol. 723. P. 452–458.

18. Дробишинець С. Я., Киричук М. В. Перспективи використання сталевібробетону в дорожньому будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. № 6. С. 90–98.

19. W. A. Elsaigh, E. P. Kearsley, J. M. Robberts. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. *Proceedings of the 24th Southern African transport conference*. 2005. P. 191–201.

20. Jonas Carsward. Shrinkage cracking of steel fibre reinforced self-compacting concrete overlays. Test methods and theoretical modelling. Doctoral thesis: Lulea Tekniska Universitet. Lulea, 2006. 250 p.

21. Majid Jaral, Er Suhaib Firdous. A review study on the steel fiber reinforced concrete pavement. *International journal of scientific development and research*. 2018. Vol. 3, Issue 4. P. 311–313.

22. Крижановський В. О. Модифіковані бетони і фібробетони для влаштування та ремонту жорстких дорожніх і аеродромних покриттів. Дисертація: Одеська державна академія будівництва та архітектури. Одеса, 2023. 185 с.

23. Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Aerodromes. Volume I: Aerodrome Design and Operations. International Civil Aviation Organization, sixth edition. 2013.

24. Mariusz Wesolowski, Krzysztof Blacha, Pawel Iwanowski. Analysis of Load Bearing Capacity of Cement Concrete Airfield Pavement's Construction in Relation to its Changes of Physico-Mechanical Parameters. *IOP Conference Series: Materials and Engineering*. 2019. 603, 052055.

25. Ayobami Busari, Bamidele Dahunsi, Joseph Akinmusuru. Sustainable concrete for rigid pavement construction using de-hydroxylated kaolinitic clay: mechanical and microstructural properties. *Construction and Building Materials*. 2019. 211. P. 408–415.

26. Mahesh Babu Awari. Construction of rigid pavements by using green concrete. *Journal of Engineering Science*. 2022. Vol. 13, Issue 7. P. 589–596.

27. Возний С. П. Перспективи розвитку цементобетонних доріг в Україні. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2017. Випуск 6. С. 47–55.

28. Офіційний веб-сайт державного агентства автомобільних доріг України. URL: <https://ukravtodor.gov.ua>. (дата звернення 15.08.2023).

29. Веб-сайт інформаційного порталу «Заповнювачі». Бетонні чи Асфальтобетонні дороги — що краще? URL: <http://surl.li/pagjd> (дата звернення 08.01.2024).

30. І. П. Гамеляк, А. С. Корецький, С. С. Корецький. Про необхідність будівництва в Україні автомобільних доріг із цементобетонним покриттям. *Науково-виробничий журнал*. 2013. № 5 (235). С. 24–31.

31. ГБН В.2.3-37641918-559:2019 Автомобільні дороги. Дорожній одяг нежорсткий. Проектування. Міністерство інфраструктури України, 2019.

32. ГБН В.2.3-37641918-557:2016 Автомобільні дороги. Дорожній одяг жорсткий. Проектування. Міністерство інфраструктури України, 2016.

33. Chyzenko N. P. Improvement of the method of evaluation of cement-concrete pavement of highways. Scientific bases of improvement of the method of evaluation of cement-concrete pavement of highways. Thesis (Cand.teh.Sc.). Kyiv, 2021. 282 p.

34. Онищенко А. М., Цепелев С. Ю., Чиженко Н. П. Прогнозування довговічності цементобетонного покриття автомобільних доріг від дії транспортних засобів. *Збірник наукових праць «Дороги і мости»*. 2022. Випуск 25. С. 78–86.

35. Возний С. П. Перспектива застосування цементобетонного покриття на транспортних спорудах. *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. 2021. 23. Р. 187–196. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2021.23.178>

36. Ю. М. Собко, Г. Я. Шевчук, Н. І. Топилко, Ю. Л. Новицький. Дорожні цементобетони на основі модифікованих добавок нової генерації. *Вісник Національного університету “Львівська політехніка”*. Серія: Теорія і практика будівництва. 2018. № 888. С. 133–137.

37. Chen Y., Cen G. P., Cui Y. H. Comparative study on the effect of synthetic fiber on the preparation and durability of airport pavement concrete. *Construction and Building Materials*. 2018. Volume 184. P. 34–44. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.06.223

38. Rixom M. R., Mailvaganam N. P. Chemical admixtures for concrete. Third edition. London: E & FN Spon, 1999. 437 p.
39. Коваль С. В. Моделирование и оптимизация состава и свойств модифицированных бетонов. Одесса: Астропринт. 2012. 424 с.
40. ДСТУ Б В.2.7-171:2008 Будівельні матеріали. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Загальні технічні умови (EN 934-2:2008, NEQ). К.: Мінрегіонбуд України, 2010.
41. Ратинов В. Б., Розенберг Т. И. Добавки в бетон. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Стройиздат, 1989. 188 с.
42. Троян В. В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф». 2010. 228 с.
43. Саницький М. А., Позняк О. Р., Кіракевич І. І., Русин Б. Г. Високофункціональні бетони на основі модифікаторів нової генерації. *Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Теорія і практика будівництва*. 2008. № 627. С. 191–197.
44. Neville A. M. Właściwości betonu. Kraków: Polski Cement. 2000. 874 p.
45. Шишко Н. С., Корх О. І., Сопов В. П. Застосування методу щільної упаковки компонентів при проектуванні складу бетону. *Будівельні матеріали і виробу*. 2018. № 1. С. 21–25.
46. Г. Я. Шевчук, Ю. М. Собко, М. П. Генсецький, О. П. Гнип, О. А. Чуб. Застосування добавок полікарбоксилатного типу у виробництві дорожніх бетонів. *Будівельне виробництво*. 2017. № 63/1. С. 62–66.
47. Г. Я. Шевчук, О. М. Гуняк, О. П. Гнип, В. М. Мішин. Розробка бетонів для дорожніх покриттів підвищеної довговічності з використанням добавок полікарбоксилатного типу. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2012. №46. С. 371–376.
48. Kryzhanovskiy V. O., Kroviakov S. O. Strength of rigid pavement concretes modified with polycarboxylate admixture on different types of cement. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. №79. С. 92–98.

49. Мишутин А. В., Солоненко И. П., Леонова А. В. Жесткие дорожные покрытия из цементобетона для автомобильных дорог. *Збірник наукових праць «Дороги і мости»*. 2018. Випуск 18. С. 119–127.
50. Cuenca-Moyano G. M., Martín-Pascual J., Martín-Morales M., Valverde-Palacios I., Zamorano M. Effects of water to cement ratio, recycled fine aggregate and air entraining/plasticizer admixture on masonry mortar properties. *Construct. Build. Materials*. 2020. 230, 116929.
51. Muataz I. Ali, Abbas A. Allawi and Ayman El-Zohairy. Flexural Behavior of Pultruded GFRP–Concrete Composite Beams Strengthened with GFRP Stiffeners. *Fibers*. 2024. 12(1), 7. <https://doi.org/10.3390/fib12010007>
52. Yaqin Chen, Muhammad Shukat Waheed, Shahid Iqbal, Muhammad Rizwan and Shah Room. Durability Properties of Macro-Polypropylene Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete. *Materials*. 2024. 17(2), 284. <https://doi.org/10.3390/ma17020284>
53. Большаков В. И., Дервянко В. Н. Дисперсно-армированные покрытия строительных конструкций и технологического оборудования – Днепропетровск: Gaudeamus. 2001. 231 с.
54. Johnston C. D. Fiber-reinforced cements and concretes. CRC Press. 2001. 372 p.
55. Maruchchak U., Sanytsky M., Korolko S., Shabatura Y., Sydor N. Development of nanomodified rapid hardening fiber-reinforced concretes for specialpurpose facilities. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. № 2/6 (92). P. 34–41.
56. Бабич Є. М., Андрійчук О. В., Ужегов С. О., Шаповал І. В. Застосування сталевібробетону в дорожньому будівництві. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2015. Вип. 4. С. 3–9.
57. Smirnova O., Kharitonov A., Belentsov Y. Influence of polyolefin fibers on the strength and deformability properties of road pavement concrete. *Journal of traffic and transportation engineering (English Edition)*. 2019. Volume 6, Issue 4. P. 407–417.

58. Karmacharya A., Gamarra J., Chao S. H. Use of ultra-high-performance Fiber-reinforced concrete (UHP-FRC) for fast and sustainable repair of rigid pavements. *Airfield and Highway Pavements 2019: Design, Construction, Condition Evaluation, and Management of Pavements*. 2019. P. 273–285.

59. Avishreshth S., Bansal P. P., Chopra T. Characterization of steel fiber reinforced pervious concrete for applications in low volume traffic roads. *Urbanization Challenges in Emerging Economies: Resilience and Sustainability of Infrastructure*. 2018. P. 93–102.

60. Elsaigh W.A., Kearsley E.P., Robberts J.M. Steel fibre reinforced concrete for road pavement applications. *SATC 2005: Transport Challenges for 2010*. 2005. P. 191–200.

61. Hussain I., Ali B., Akhtar T., Jameel M. S., Raza S. S. Comparison of mechanical properties of concrete and design thickness of pavement with different types of fiber-reinforcements (steel, glass, and polypropylene). *Case Studies in Construction Materials*. 2020. Volume 13, e00429.

62. Иванов И. А., Бузаева М. М. Комбинированная дорожная плита с использованием фибробетона. *Вестник ВСГУТУ*. 2016. №4. С. 12–18.

63. Benmokrane B., Bakouregui A. S., Hamdy M., Thebeau D., Abdelkarim O. Design, construction, and performance of continuously reinforced concrete pavement reinforced with GFRP bars: case study. *Journal of Composites for Construction*. 2020. Volume 24, Issue 5, 05020004.

64. Rashid M.U. Experimental investigation on durability characteristics of steel and polypropylene fiber reinforced concrete exposed to natural weathering action. *Construction and Building Materials*. 2020. Volume 250, 118910.

65. Željko Kos, Sergii Kroviakov, Andrii Mishutin, Andrii Poltorapavlov. An Experimental Study on the Properties of Concrete and Fiber-Reinforced Concrete in Rigid Pavements. *Materials MDPI*. 2023. Vol. 16. 5886.

66. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Grynyova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid

highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. 2022. Volume 12, Issue 3: 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174>

67. M. Sanytsky, U. Marushchak, Y. Olevych, Y. Novytskyi. Nano-modified ultra-rapid hardening portland cement compositions for high strength concretes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. 47. P. 392–399. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_50.

68. Кривяков С. О., Шестакова Л. Є. Міцність, зносостійкість і морозостійкість фібробетонів жорстких дорожніх покриттів із базальтовою фіброю та повітровтягуючою добавкою. *Збірник наукових праць «Дороги і мости»*. 2023. Issue 28. P. 144–158. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2023.28.144>

69. Sylvain Guignot, Solene Touze, Frederic Von der Weid, Yannick Menard, Jacques Villeneuve. Recycling Construction and Demolition Wastes as Building Materials. A Life Cycle Assessment. *Journal of industrial ecology*. 2015. P. 1–13.

70. Abdol R. Chini, Stuart F. Bruening. Deconstruction and materials reuse in the United States. *The Future of Sustainable Construction*. 2003. P. 1–22.

71. European Union. WasteStat. Eur. Retrieved 10 6, 2019, from Eurostat.

72. Abhishek Jindal, G. D. Ransinchung R. N., Praveen Kumar. Recycled concrete aggregates for rigid pavements: a review. *Conference paper. International Conference on Sustainable Civil Infrastructure*. 2014. P. 635–646.

73. Yash Lohana, Sourabh Patil. Analytical study of productivity and efficiency of economic gains in reclamation of construction waste. *Conference paper. 5th IC – CRIP*. 2021.

74. I. V. Pentegov. Secondary resources. *Congress on waste management. Publ. group press*. 2001. № 1. P. 25–30.

75. F. Agrela, J. L. Díaz-Lopez, J. Rosales, G. M. Cuenca-Moyano, H. Cano, M. Cabrera. Environmental assessment, mechanical behavior and new leaching impact proposal of mixed recycled aggregates to be used in road construction. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 280. 124362.

76. Myhammet Fachratov. Crushed concrete as concrete aggregate in the manufacture of reinforced concrete structures. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 193, 02005.

77. Popov O., Chystiakov A., Petrovsky A. Analytical methods for selection of demolition technology. *Conference paper. Computational Civil Engineering Conference*. 2021.

78. Методичні рекомендації з проектування шарів дорожніх одягів із застосуванням подрібненого цементобетону. Перша редакція. Державне агентство автомобільних доріг України, Державний дорожній науково-дослідний інститут імені М.П. Шульгіна. МР В.2.3–37641918-882:201Х. 2017.

79. Веб-сайт компанії «A-Z Stav» з переробки будівельних відходів та виробництва вторинних бетонних фракцій (Словацька Республіка, м Братислава). URL: <https://www.azstav.sk/> (дата звернення 11.09.2023).

80. Galitskova Yu., Mikhasek A. The possibility of using materials based on secondary gravel in civil construction. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 106, 04018.

81. Monisola Dorcas Obebe, Catherine Mayowa Ikumarayi, Kenneth Kanayo Alaneme. Structural performance evaluation of concrete mixes containing recycle concrete aggregate and calcined termite mound for low-cost housing. *Alexandria Engineering Journal*. 2023. Issue 72. P. 237–246.

82. Морковська Н. Г., Абделрахем А. Переробка будівельних відходів, що утворюються в Україні. *Комунальне господарство міст*. 2019. Том 1, випуск 147. С. 210–214. <https://doi.org/10.33042/2522-1809-2019-1-147-210-214>

83. Белобородов Р. О., Шейніч Л. О. Використання подрібненого бетону в будівництві. *Наука та будівництво*. 2023. 2(36), С. 83–86. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-2-2023-9>

84. Silva R. V., de Brito J., Dhir R. K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Issue 236, 177629.

85. ETN, 2000. Use of recycled materials as aggregates in the construction industry. *ETN Recycl. Constr.* 2 (3 & 4), 1-12.
86. Fernandes E. M., Gomes S., Gonçalves F. Recycled aggregates for unbound sub-base pavement layers (in Portuguese). *Elsamex Portugal, S.A. (Ed.)*. 2009.
87. Lee K. Y. P., Ho N. Y., Tan J. Y., Yoong C. C., Lim J. C., Lee K. K. Field Study on the Use of Recycled Concrete Aggregate for Road Trenching Works in Singapore. *2nd World Roads Conference Singapore*. 2009. P. 8.
88. Rijnsburger H. A., Goumans J. J. J. M., Senden. G. J., van der Sloot H. A. Test project “crushed masonry 50/150 mm in the Ventjagersplaat river dam”. *Waste Materials in Construction: Putting Theory into Practice*. Elsevier. 1997. P. 91–94.
89. WRAP. Use of Recycled and Secondary Aggregates in the Construction of the Newport Southern Distributor Road. Waste & Resources Action Programme. 2003. Oxon, UK, p. 4.
90. Sadati S., Khayat K. H. Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. *Constr. Build. Mater.* 2016. Issue 126. P. 691–700.
91. Sommer H. Tasteful solution: land of salt mines goes green in megaproject. *Roads Bridg.* 2012. P. 46–48.
92. Веб-сайт компанії RC-Beton. Office building in Mannheim-neuostheim, Germany. URL: Freely available at: <http://www.rc-beton.de/index-pilotprojekte.html> (дата звернення 19.09.2023).
93. Grübl P., Nealen A., Schmidt N. Concrete made from recycled aggregate: experiences from the building project Waldspirale. *Darmstadt Constr.* 1999. 14. P. 1-5.
94. Веб-сайт Wikipedia.de. Radig G. Darmstadt, Waldspirale, hundertwasser-house. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Waldspirale_Darmstadt_-_Hundertwasser-Haus.JPG (дата звернення 19.09.2023).
95. Jagadeesh S., Venkateswara Rao J., Vasavadatta Ch. An experimental study on the effective use of recycled concrete aggregates in rigid pavements. *International Journal of Civil Engineering and Technology*. 2018. P. 1519–1528.

96. David L. Gress, Mark B. Snyder, Jeffrey R. Sturtevant. Performance of rigid pavements containing recycled concrete aggregates. *Gress, Snyder and Sturtevant*. 2006. P. 1–24.
97. EN, B. Aggregates for Concrete. British Standard Institute, Brussels, p. 12620. European Commission. 2014.
98. Thomas C., Setien J., Polanco J.A., de Brito J., Fiol F. Micro-and macroporosity of dry-and saturated-state recycled aggregate concrete. *J. Clean. Prod.* 2019. Vol. 211. P. 932–940.
99. Barbudo A., Galvín A.P., Agrela F., Ayuso J., Jimenez J.R. Correlation analysis between sulfate content and leaching of sulfates in recycled aggregates from construction and demolition wastes. *Wastemanagement*. 2012. Vol. 32(6). P. 1229–1235.
100. Cabrera M., Galvin A. P., Agrela F., Beltran M. G., Ayuso J. Reduction of leaching impacts by applying biomass bottom ash and recycled mixed aggregates in structural layers of roads. *Materials*. 2016. Vol. 9(4). P. 228.
101. Galvín A. P., Agrela F., Ayuso J., Beltran M. G., Barbudo A. Leaching assessment of concrete made of recycled coarse aggregate: physical and environmental characterisation of aggregates and hardened concrete. *Waste Management*. 2014. Vol. 34 (9). P. 1693–1704.
102. Shi-Cong Kou, Chi-Sun Poon. Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Constr. Build. Mater.* 2009. Vol. 23 (8). P. 2877–2886.
103. IRC:SP:63-2004. Guidelines for the use of interlocking concrete blocks. *Indian Road Congr.* 2004.
104. Poon C. S., Kou S. C., Lam L. Use of recycled aggregates in molded concrete bricks and blocks. *Constr. Build. Mater.* 2002. 16 (5). P. 281–289.
105. IS:15658-2006. Bureau of Indian Standards (BIS). Specification for Precast Concrete Blocks For Paving. 2006.
106. Schuur H. M. L. Calcium Silicate Products With Crushed Building. *J. Mater. Civ. Eng.* 2000. Vol. 12. P. 282–287.

107. Leiva C., Solís-Guzmán J., Marrero M., García Arenas C. Recycled blocks with improved sound and fire insulation containing construction and demolition waste. *Waste Manage.* 2013. Vol. 33(3). P. 663–671.
108. Iqbal Marie, Hisham Quiasrawi. Closed-loop recycling of recycled concrete aggregates. *J. Cleaner Prod.* 2012. Vol. 37. P. 243–248.
109. Gyanendra Kumar Attri, R. C. Gupta, Sandeep Shrivastava. Impact of recycled concrete aggregate on mechanical and durability properties of concrete paver blocks. *Materials Today: Proceedings.* 2021. Vol. 42. P. 975–981.
110. L. A. A. Al-Hindawi, A. M. Al-Dahawi, A. Sh. J. Al-Zuheriy. Use of Waste Materials for Sustainable Development of Rigid Pavement. *International Journal of Engineering.* Vol. 36 №10. P. 1919–1931. <https://doi.org/10.5829/ije.2023.36.10a.16>.
111. Mohit Nandal, Hemant Sood, Pardeep Kumar Gupta. A review study on sustainable utilisation of waste in bituminous layers of flexible pavement. *Case Studies in Construction Materials.* 2023. 19, e02525. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02525>.
112. Natt Makul. Cost-benefit analysis of the production of ready-mixed high-performance concrete made with recycled concrete aggregate: A case study in Thailand. *Heliyon.* 2020. Vol. 6. e04135.
113. DiMaria A., Eyckmans J., VanAcker K. 2018. Down cycling versus recycling of construction and demolition waste: combining LCA and LCC to support sustainable policymaking. *WasteManag.* 2018. 75. P. 3–21.
114. Xiao J. Modeled Recycled Aggregate Concrete. *Springer Tracts in Civil Engineering.* 2017. P. 99–142.
115. Seriki, Oluwasegun Oluwaseyi. Effects of ordinary portland cement-bentonite blend on compressive strength of concrete mixes using 19mm size coarse aggregate. Bachelor of Engineering in Civil Engineering diploma thesis. Akure Federal University of Technology. 2010.
116. Francesca Cappelletti, Tiziano Dalla Mora, Fabio Peron, Piercarlo Romagnoni, Paolo Ruggeri. Building renovation: which kind of guidelines could be

proposed for policy makers and professional owners? *6th International Building Physics Conference*. 2015. P. 2367–2372.

117. Dvorkin L., Zhitkovsky V., Sonebi M., Marchuk V. Activated Low Clinker Slag Portland Cement and Concrete on Its Basis. Improving Concrete and Mortar Using Modified Ash and Slag Cements. 2020. P. 61-125.

118. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O. Strength of concrete for bases of road clothes on different types of secondary gravel and sand. *Modern construction and architecture*. 2023. №5. P.79–85.

119. ДСТУ Б В.2.7-114-2002 Будівельні матеріали. Суміші бетонні. Методи випробувань (ГОСТ 10181-2000). К.: Державний комітет архітектури, будівництва і житлової політики України, 2002.

120. ДСТУ Б В.2.7-214:2009 Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками. К.: Мінрегіонбуд України, 2010.

121. ДСТУ Б В.2.7-170:2008 Бетони. Методи визначення середньої густини, вологості, водопоглинання, пористості і водонепроникності. Зміна № 1. К.: Мінрегіонбуд України, 2010.

122. ДСТУ Б В.2.7-49-96. Будівельні матеріали. Бетони. Прискорені методи визначення морозостійкості при багаторазовому заморожуванні та відтаванні. К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1996. 9 с.

123. ДСТУ Б В.2.7-47-96. Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення морозостійкості. К.: Державний комітет України у справах містобудування і архітектури, 1996. 15 с.

124. Todor Vacev, Andrija Zorić, Dušan Grdić, Nenad Ristić, Zoran Grdić, Miloš Milić. Experimental and Numerical Analysis of Impact Strength of Concrete Slabs. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2023. Vol. 67(1). P. 325–335. <https://doi.org/10.3311/PPci.21084>

125. Бутт Ю. М., Тимашев В. В. Практикум по химической технологии вяжущих материалов. М.: Высшая школа. 1973. 504 с.

126. ДСТУ Б В.2.7-232:2010 Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань К.: Мінрегіонбуд України, 2011.

127. ДСТУ Б В.2.7-71-98 Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань (ГОСТ 8269.0-97). З Поправкою К.: Госстрой України, 1999.

128. EN 15804:2012, A2:2019, AC:2021 Sustainability of construction works. Environmental product declarations. Core rules for the product category of construction products, 2021.

129. Офіційний сайт Інформаційний портал сталого будівництва ÖKOBAUDAT при Федеральному міністерстві житлового будівництва, міського розвитку та будівництва Німеччини: веб-сайт. URL: https://www.oekobaudat.de/no_cache/en/database/search.html (дата звернення 08.11.2023).

130. Erukhimov A. L. Building materials. Prospects for the use of construction waste. Publ. group Press. 1999. No. 12 . P. 23–28.

131. Gusev B. V., Zagursky V. A. Recycling of concrete. Stroyizdat. 1988. P. 95.

132. Arsentiev V. A., Marmandyan V. Z., Dobromyslov D. D. Modern technological lines for construction recycling. *Construction materials*. 2006. No. 8. P. 64–66.

133. Выровой В. Н., Дорофеев В. С., Суханов В. Г. Композиционные строительные материалы и конструкции. Структур, самоорганизация, свойства: монография. Одесса: Изд-во «ТЭС». 2010. 169 с.

134. S. O. Kroviakov, A. O. Chystiakov, A. O. Bershadskyi, T. I. Shevchenko. Concretes on secondary crushed stone as a promising material for the rigid pavement base. *Bulletin of Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2022. №87. P. 85–91. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-85-91>.

135. Кровяков С.О., Мішутін А.В. Підвищення довговічності легких конструкційних бетонів для гідротехнічних і транспортних споруд шляхом оброблення поверхні пористого заповнювача. *Наука та будівництво*. 2017. №3. С. 50–58. <https://doi.org/10.33644/scienceandconstruction.v13i3.89>

136. Kryzhanovskiy V.O., Kroviakov S.O. Strength of rigid pavement concretes modified with polycarboxylate admixture on different types of cement. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. №79, С. 92–98. <https://doi.org/10.31650/2415-377X-2020-79-92-98>

137. ДБН В.2.3-4:2015. Автомобільні дороги. Споруди транспорту. Частина I. Проектування. Частина II. Будівництво. К.: Мінрегіонбуд України, 2015. 112 с.

138. Sanytsky M., Marushchak U., Olevych Y., Novytskyi Y. Nano-modified ultra-rapid hardening portland cement compositions for high strength concretes. *Lecture Notes in Civil Engineering*. 2020. 47. P. 392–399. https://doi.org/10.1007/978-3-030-27011-7_50

139. Дворкін Л.Й. Міцність бетону. К.: Кондор, 2021. 312 с.

140. Volchuk V., Kroviakov S., Kryzhanovskyi V. Strength assesment of lightweight concrete considering metric variance of the structural elements. *Romanian Journal of Materials*. 2022. 52(2). P. 185–193

141. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Використання вторинних заповнювачів для бетонів основи дорожнього одягу. *Наука та будівництво*. 2023. №4(38). С. 34–40. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-5>

142. Кровяков С. О., Мішутін А. В. Рецептурно-технологічні методи підвищення довговічності бетонів на легких заповнювачах для тонкостінних гідротехнічних і транспортних споруд. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*. Випуск 36. Рівне: Волинські береги, 2018. С. 55-63.

143. Дворкін Л. Й., Пушкарьова К. К., Дворкін О. Л., Кочевих М. О., Мохорт М. А., Безсметртний М. П. Використання техногенних продуктів у будівництві. – Навчальний посібник. Рівне, 2009. 400 с.

144. Babar Ali, Muhammad Fahad Hawreen Ahmed, Ahmed Salih Mohammed, Ahmed Babeker Elhag, Marc Azab. Improving the performance of recycled aggregate concrete using nylon waste fibers. *Case Studies in Construction Materials*. 2022. 17, e01468. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01468>

145. Jinsong Liao, Fuhai Li, Jing Gong, Lei Zhao, Xi Tong, Xinxin Li. Durability of Recycled Concrete after Reinforcing the Aggregates with Permeable Crystalline

Materials. *Advantages in Civil Engineering*. 2024. Volume 2024.
<https://doi.org/10.1155/2024/9978563>

146. ДСТУ Б EN 12620:2013 Заповнювачі для бетону (EN 12620:2002+A1:2008, IDT). К.: Мінрегіонбуд України, 2014.

147. S. Kroviakov, V. Volchuk, M. Zavaloka, V. Krizhanovsky, "Search for ranking approaches of expanded clay concrete quality criteria", *Materials Science Forum*. 2019. № 968. P. 20–25.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.968.20>.

ДОДАТКИ

**Список публікацій здобувача за темою дисертації та відомості про
апробацію результатів дисертації**

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

Статті у наукових фахових виданнях України

1. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O. Properties of concrete and fiber-reinforced concrete for bases of road clothes based on secondary aggregates with heterogeneous composition. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2024. №6. С. 99–108. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-7-99-108>

2. Кровяков С.О., Чистяков А.О. Використання вторинних заповнювачів для бетонів основи дорожнього одягу. *Наука та будівництво*. 2023. №4(38). С. 34–40. <https://doi.org/10.33644/2313-6679-4-2023-5>

3. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O. Strength of concrete for bases of road clothes on different types of secondary gravel and sand. *Сучасне будівництво та архітектура*. 2023. №5. С. 79–85. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2023-5-79-89>

4. Kroviakov S. O., Chystiakov A. O., Bershadskyi A. O., Shevchenko T. I. Concretes on secondary crushed stone as a promising material for the rigid pavement base. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2022. №87. С. 85–91 <http://doi.org/10.31650/2415-377X-2022-87-85-91>

Статті у наукових періодичних виданнях інших держав

5. Chystiakov A., Bodiak K. Methodology for concrete research based on secondary aggregates. *Advances in Architectural, Civil and Environmental Engineering*. 2023. №33. P. 70–76.

6. Popov O., Chystiakov A., Petrovsky A. Analytical methods for selection of demolition technology. *IOP Conference Series: Materials, Science and Engineering*. 2021. 1141, 012029. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/1141/1/012029>

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

7. Кровяков С. О., Чистяков А. О., Ігнатенко А. В. Використання вторинних заповнювачів в бетонах основи дорожнього одягу. *Роль науки у відбудові України* : тези доп. III всеукраїнської наук.-практ. конф. (м. Київ, 29 лист. 2023 р.). Київ, 2023. С. 4–6.

8. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Влив вторинних заповнювачів на міцність бетонів для основи дорожнього одягу. *Гідротехнічне і транспортне будівництво* : збірник тез міжнародної наук.-практ. конф. (м. Одеса, 25–26 травня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 77–79.

9. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Застосування вторинного щебеню і піску в бетоні основи дорожнього одягу. Збірка тез доповідей 79-ї наук.-тех. конф. професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. (м. Одеса, 18–19 травня 2023 р.). Одеса, 2023. С. 185.

10. Кровяков С. О., Чистяков А. О., Бершадський А. О. Міцність і середня густина бетонів на вторинному щебені для основ автомобільних доріг. *Гідротехнічне і транспортне будівництво* : збірник тез міжнародної наук.-практ. конф. (м. Одеса, 27–28 травня 2022 р.). Одеса, 2022. С. 29–31.

11. Кровяков С. О., Чистяков А. О. Властивості бетонів основ автомобільних доріг на вторинному щебені. Збірка тез доповідей 78-ї науково-технічної конференції професорсько-викладацького складу Одеської державної академії будівництва та архітектури. (м. Одеса, 19–20 травня 2022 р.). Одеса, 2022. С. 200.

Відомості про результати апробації дисертації

- 26-та міжнародна наукова конференція з цивільної інженерії «Juniorstav-2024» (Брно, Чехія, 25 січня 2024 р. – очна участь);
- III Всеукраїнська науково-практична конференція «Роль науки у відбудові України» (Київ, 29 листопада 2023 р. – очна дистанційна участь);
- 33-тя щорічна аспірантська конференція з прикладної математики, технології будівництва, геодезії та картографії, ландшафтного дизайну, теорії конструкцій будівель, інженерії водних ресурсів (Братислава, Словачька Республіка, 25 жовтня 2023 р. – очна участь);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Одеса, 25–26 травня 2023 р. – очна дистанційна участь);
- 79-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу академії (Одеса, 18–19 травня 2023 р., – очна дистанційна участь);
- Міжнародна науково-технічна конференція «Гідротехнічне і транспортне будівництво» (Одеса, 27–28 травня 2022 р. – очна дистанційна участь);
- 78-а науково-технічна конференція професорсько-викладацького складу академії (Одеса, 19–20 травня 2022 р. – очна дистанційна участь);
- Computational Civil Engineering Conference CCE2021 (Яси, Румунія, 27–29 травня 2021 р. – очна дистанційна участь);
- 2-га міжнародна конференція «Innovative Trends on Engineering for Sustainability» ICITES 2021 (Керала, Індія, 9–11 січня 2021 р. – очна дистанційна участь).



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ОДЕСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ БУДІВНИЦТВА ТА АРХІТЕКТУРИ

вул. Дідріхсона, 4, м. Одеса, 65052, тел./факс: (048) 723-69-04, тел. (048) 723-43-53.

e-mail: list@odaba.edu.ua, веб-сайт: www.odaba.edu.ua, код СДРПОУ 02071033

08.03.2024 № 08-23-300 На № _____ від _____
Г _____ Г

ДОВІДКА

про впровадження результатів дисертаційного дослідження

Видана Чистякову Артему Олександровичу, здобувачу вищої освіти ступеня доктора філософії 4-го року навчання за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія, що дисертаційне дослідження за темою «Бетони основи дорожнього одягу з використанням вторинних заповнювачів», яке містить нові науково обґрунтовані результати в галузі дорожнього будівництва, впроваджене у освітній процес Одеської державної академії будівництва та архітектури.

Окремі наукові результати А.О. Чистякова використовуються при підготовці магістрів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми» у методичних матеріалах освітніх компонентів «Ресурсозбереження та новітні технології у будівництві автомобільних доріг та аеродромів» і «Сучасні будівельні матеріали».

Результати досліджень А.О. Чистякова також були використані при підготовці магістерських дипломних робіт за освітньо-професійною програмою «Автомобільні дороги і аеродроми» спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

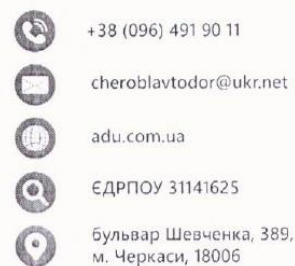
Проректор з НПП

Ірина АЖАМАН

Продовження додатку Б



**ДОЧІРНЄ ПІДПРИЄМСТВО
«ЧЕРКАСЬКИЙ ОБЛАВТОДОР»
ВАТ «ДАК «АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ УКРАЇНИ»**

№ 79/03«09» 02 2024р

Акт про впровадження результатів наукових досліджень

Цей акт підтверджує, що результати дисертаційних досліджень аспіранта Одеської державної академії будівництва та архітектури Артема Чистякова (науковий керівник – д.т.н., проф. Сергій Кровяков) були використані у ДП «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України» при влаштуванні бетонних основ дорожнього одягу під'їзду до мосту на автомобільній дорозі загального користування, державного значення Т-24-03, Орадівка – Христинівка – Жашків – Корсунь-Шевченківський – Мошни, км 163+000, с. Шендерівка, Корсунь-Шевченківського району, Черкаської області.

Використовувалася отримана дослідниками технічна інформація щодо можливості використання воринного щебеню для бетонних основ автомобільних доріг, а також надані їм рекомендовані склади бетонів.

Цей акт не фінансовим документом і підтверджує зацікавленість ДП «Черкаський облавтодор» ВАТ «ДАК «Автомобільні дороги України» у використанні наукових результатів науковців Одеської державної академії будівництва та архітектури в виробничій практиці.

Т.в.о. директора



Андрій ІГНАТЕНКО