

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

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**ГІДЕЙ ВОЛОДИМИР ВОЛОДИМИРОВИЧ**

**ДИСЕРТАЦІЯ  
КОМПОЗИЦІЙНІ СИСТЕМИ З ВИКОРИСТАННЯМ  
ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ПАПЕРОВОГО ВИРОБНИЦТВА  
ДЛЯ ДОРОЖНЬОГО БУДІВНИЦТВА.**

192 Будівництво та цивільна інженерія

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

/В.В. Гідей/

Науковий керівник

Соболь Христина Степанівна,  
доктор технічних наук, професор

Львів – 2023

## АНОТАЦІЯ

Гідей В.В. Композиційні системи з використанням термоактивованих відходів паперового виробництва для дорожнього будівництва. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192. Будівництво та цивільна інженерія ( 19 – Архітектура та будівництво). – Національний університет «Львівська політехніка», Львів, 2023.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню завдання отримання композиційних систем з використанням термоактивованих відходів паперового виробництва для дорожнього будівництва і встановлення особливостей формування комплексу фізико-механічних та експлуатаційних властивостей цементних дорожніх бетонів та укріплених ґрунтів з покращеними властивостями.

У *першому розділі* на основі критичного огляду літературних джерел розглянуто теоретичні засади та експериментальні дані щодо шляхів покращення властивостей елементів конструкцій дорожнього одягу з можливістю використання відходів паперового виробництва з макулатурного скопу. Показано, що дорожнє будівництво є матеріало- і енергозатратною галуззю, яка споживає значну кількість природних ресурсів, тому закономірним є прагнення замінити частину природних матеріалів відходами виробництв, що водночас зменшуватиме вплив на навколишнє середовище.

За даними Міжнародного енергетичного агенства (ІЕА) світова паперово-целюозна промисловість продукує щорічно приблизно 11 мільйонів тонн макулатурного скопу щорічно. Оптимальним розв'язанням проблеми їх утилізації є не тільки вирішення екологічних проблем, але і комплексне використання енергетичного ресурсу його органічної складової як альтернативного палива, з наступним залученням утворених термооброблених відходів у будівельну індустрію, зокрема у дорожнє будівництво. Зазначено, що ресурсна цінність макулатурного скопу полягає також в тому, що продукт його термооброблення - термоактивовані відходи (ТАВ) - є цінною мінеральною сировиною

алюмосилікатного складу, які проявляють гідравлічну або пуцоланічну активність, залежно від складу та технології випалу. Таким чином, застосування ТАВ у будівництві відповідає принципам циркулярної економіки, зокрема «Reduce – Reuse – Recycle»(3R) - «Зменшення – Повторне використання – Переробка».

Розглянуто і проаналізовано новітні тенденції застосування ТАВ як складових композиційних систем для дорожнього будівництва. За результатами огляду літературних джерел встановлено, що влаштування основи дорожнього одягу з ґрунтів, укріплених в'язучими на основі ТАВ, є ефективним.

Аналіз відомих закономірностей формування структури дорожньо-будівельних матеріалів дає змогу висунути наукову гіпотезу про доцільність розроблення композиційних систем з використанням регульованих термоактивованих відходів паперового виробництва в конструкціях дорожнього одягу, зокрема цементобетонів, направлене формування їх структури з метою досягнення підвищених характеристик міцності, морозостійкості, водонепроникності, тріщиностійкості та стираності.

У розділі 2 «Методів досліджень та характеристика вихідних матеріалів» описано методи проведення експериментальних досліджень та наведено характеристику вихідних матеріалів. Представлено загальну послідовність виконання досліджень у вигляді блок-схеми. Наведено фізико-механічні властивості, мінералогічний та хімічний склади портландцементів ПрАТ «Волиньцемент», хімічний склад ТАВ та доменного гранульованого шлаку ПАТ «Арселорміттал Кривий Ріг», а також властивості заповнювачів: гранітного щебеню кар'єру м. Коростень Житомирської області, та кварцового піску Жовківського кар'єру Львівської області. Для регулювання структуроутворення ТАВ використовували добавку природнього гіпсового каменю та органічні кислоти – винну, лимонну та неорганічну борну кислоту. Для дорожніх бетонів використовували повітровтягувальну добавку Microporan та суперпластифікатор Stachement 2570.

Для дослідження ефективності використання термоактивованих відходів паперової промисловості для укріплення ґрунтів дорожньої основи

використовувались чотири типи ґрунтів, які найчастіше зустрічаються на території України, а саме: суглинистий пісок, супісок, глинистий суглинок та піщана глина.

Фізико-механічні випробування в'язучих, ґрунтів та дорожніх цементобетонів проводили відповідно до чинних ДСТУ, ISO, EN та загальноприйнятими методиками. Зокрема, для укріплених ґрунтів визначали каліфорнійський коефіцієнт несучої здатності (CBR), набухання, максимальну щільність за методом Проктора, а також границю міцності на стиск та морозостійкість укріплених ґрунтів. Дослідження процесів структуроутворення в композиційних системах виконували сучасними методами фізико-хімічного аналізу (рентгенівська дифрактометрія, растрова електронна мікроскопія, диференційна термогравіметрія та ін.).

У розділі 3 «Дослідження складу та особливостей гідратаційного тверднення термоактивованих відходів паперового виробництва» вивчено фізико-хімічні та гідравлічні властивості ТАВ. Показано, що при їх термообробці відбуваються процеси, характерні для карбонатно-глинистої сировини, які включають дегідратацію каоліну, декарбонізацію крейди з утворенням термоактивованих відходів паперового виробництва, до складу яких входять  $\beta$ - $C_2S$ ,  $C_{12}A_7$ ,  $C_3A$ ,  $C_2AS$ . Встановлено, що гідратація ТАВ характеризується надзвичайно активною взаємодією з водою, що супроводжується бурхливим тепловиділенням і швидким тужавінням. Показано, що необхідною умовою, яка забезпечує гідратаційне тверднення термоактивованих відходів є обов'язкове регулювання процесів його раннього структуроутворення шляхом використання комплексних добавок сповільнюючих тужавіння, зокрема добавки оптимального складу 7,0 мас%  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$  та 1,0 мас % винної кислоти, використання яких забезпечує підвищені показники міцності з одержання технологічно обґрунтованих термінів тужавіння, та дозволяє отримати регульовані термоактивовані відходи (РТАВ).

Встановлено, що гідратною фазою, яка забезпечує сповільнення тужавіння та ранню міцність РТАВ є еtringіт  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ . На ранніх стадіях гідратації в таких системах переважає гідроалюмінатний тип тверднення з утворенням конверсійно стабільних гексагональних AFm-фаз кальцію. При подальшому

твердненні утворюються гідросилікати кальцію, які ущільнюють структуру, сприяючи збільшенню міцності в'язучого на основі регульованих термоактивованих відходів.

Мікроструктура гідратованих РТАВ характеризується значною різноманітністю форм – дрібнокристалічних, слабо кристалічних і добре закристалізованих частинок різних розмірів.

У розділі 4 «Використання регульованих термоактивованих відходів для укріплення ґрунтів» розроблено склади ґрунтів, укріплених РТАВ та досліджено їх будівельно-технічні властивості. Визначено максимальну щільність сухого ґрунту за тестом Проктора, що для глинистого ґрунту становить 14,1 мас.%, для суглинистого ґрунту – 19,1 мас.%, для супіщаного ґрунту – 13,8 мас.% та для піску – 7,2 мас.%. Для дослідження можливості заміни в ґрунтових сумішах портландцементу на регульовані термоактивовані відходи використовували РТАВ в кількості 8-14 мас.%, а також для порівняння портландцемент ПЦ ІІ/А-Ш 500 в кількості 6-10 мас.%.

Для апробації розроблених ґрунтових сумішей були проведені дослідження впливу кількості та виду в'язучого на властивості укріплених ґрунтів. Встановлено, що набухання укріплених ґрунтів зменшується незалежно від виду в'язучого, в той час як несуча здатність, визначена на основі каліфорнійського коефіцієнту СBR, для укріплених ґрунтів порівняно з неукріпленими зростає із збільшенням вмісту в'язучих, особливо РТАВ.

Як показали проведені дослідження, використання РТАВ в кількості 14 мас.% замість 10 мас.% ПЦ сприяє процесу направленої структуроутворення, яке забезпечує укріплення шару земляного полотна та досягнення високих показників морозостійкості та міцності з отриманням марок укріпленого ґрунту М10, М20 та М40. Одержані результати випробувань добре корелюють з дослідженнями мікроструктури, що характеризується наявністю напіввпорядкованих волокнистих кристалів продуктів гідратації РТАВ, які обволікають частинки ґрунту, забезпечуючи формування об'ємно-просторового силового каркасу.

*Розділ 5 «Використання регульованих термоактивованих відходів як*

додаткових цементуючих матеріалів в дорожніх цементобетонах» присвячений дослідженню властивостей композиційних систем з різним співвідношенням доменного гранульованого шлаку та регульованих термоактивованих відходів, а також розробленню, оптимізації складу і визначенню властивостей дорожніх цементобетонів. Встановлена ефективність використання РТАВ для активізації ДГШ, яка відбувається за сульфатним та частково лужним механізмами. Результати фізико-механічних випробувань зразків композиційної системи «ДГШ-РТАВ» показали, що найвищу ранню міцність – 2,23 МПа на згин та 7,6 МПа на стиск досягають зразки із максимальним вмістом РТАВ – 70 мас.%. Це пояснюється швидкою гідратацією алюмінатних фаз в складі РТАВ, що забезпечує міцність при ранньому структуроутворенні. Проте найвищими показниками міцності як на стиск (38,3МПа), так і, особливо, на згин (4,6 МПа) у пізні терміни гідратації, коли переважає гідросилікатний тип тверднення, характеризуються зразки з співвідношенням ДГШ:РТАВ=70:30.

Дослідження фазового складу розробленої композиційної системи свідчать про утворення гідросилікатів  $CSH(B)$ , а також гідроалюмінатів кальцію  $C_4AH_{13}$ , які взаємодіючи з гіпсом, присутнім в складі РТАВ, утворюють гідросульфалюмінат кальцію  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  вже в початковий період гідратації. Це добре корелює з результатами електронно-мікроскопічних досліджень.

В роботі наведено результати дослідження властивостей шлаковмісних портландцементів ПЦІ/А-Ш-500 та ПЦІ/Б-Ш-400, які застосовують в технології дорожнього будівництва, з використанням РТАВ як додаткового цементуючого матеріалу (ДЦМ). Показано, що серед досліджених складів композиційних систем з вмістом 5,0 та 10,0 мас.% в'язучого найвищих значень міцності, як на розтяг при згині, так і при стиску, досягли зразки, в складі яких 5 мас.% портландцементів ПЦ І/А-Ш-500 та ПЦ І/Б-Ш-400 були замінені на 5 мас.% РТАВ.

Встановлено, що введення РТАВ спричиняє деяке зростання нормальної густоти цементного тіста та скорочення термінів тужавіння. Проте міцність цементів, визначена згідно EN 197, вказує на доцільність використання РТАВ у дорожньому будівництві. Зокрема, незважаючи на дещо нижчі показники міцності

у ранні терміни тверднення, у віці 28 діб найвищою міцністю на розтяг при згині  $R_{зг}=7,4\div 7,8$  МПа характеризуються склади з вмістом 5 мас.% РТАВ.

З метою визначення оптимального співвідношення між суперпластифікатором Stachement 2570 та додатковим цементуючим матеріалом РТАВ, методом математичного планування експерименту визначено вплив факторів складу на фізико-механічні характеристики цементобетону. Аналіз поверхонь функцій відгуку міцності на стиск та розтяг при згині свідчать, що використання 5 мас. % РТАВ та 0,8 мас.% суперпластифікатора Stachement 2570 забезпечують активну кінетику набору ранньої міцності та найвищу міцність бетону на розтяг при згині, що відповідає класу  $B_{тб}$  6,4, та досягнення класу бетону за міцністю на стиск С 40/50.

Розроблено жорсткі бетонні суміші номінального складу 1:1,9:3,8 з вмістом 0,8 мас.% суперпластифікатора, 0,2 мас.% повітровтягувальної добавки Microporan. Показано, що для зразків з добавкою 5 мас.% РТАВ на основі ПЦ ІІ/Б-Ш-400 з вмістом втягнутого повітря 5,2 об.% міцність на згин у віці 180 діб становить 10,1 МПа, що є найвищим показником серед досліджуваних зразків. За результатами визначення водопоглинання, глибини проникнення води та відкритої пористості показано, що введення РТАВ ущільнює структуру бетону та знижує його проникність.

Досліджено вплив РТАВ на силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості розроблених дорожніх бетонів. Аналіз отриманих повних діаграм стану бетонів свідчить про позитивний ефект від додавання 5 мас.% РТАВ на роботу бетону як в докритичній ( $G_i=225-230$  Дж/м<sup>2</sup>), так і закритичній ( $G_F=650-607$  Дж/м<sup>2</sup>) стадіях, а також характеризуються найвищими статичними критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_i=0,96-0,98$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Зазначено, що незважаючи на дещо нижчі фізико-механічні показники бетону на основі ПЦІІ/Б-Ш-400 з 10 мас.% РТАВ, його характеристики тріщиностійкості перевищують обидва склади без додаткових цементуючих матеріалів, що підтверджує синергізм системи РТАВ-ДГШ у контексті механіки руйнування.

Встановлено, що бетони з оптимальним вмістом РТАВ характеризуються

значною стійкістю до дії поперемінної дії заморожування і відтавання з досягненням марки за морозостійкістю F300 та стиранистю  $G=0,29$  г/см<sup>2</sup>.

У шостому розділі наведено результати дослідно-промислової апробації композиційних систем з використанням регульованих термоактивованих відходів паперового виробництва. Розроблені РТАВ використовували як в'язучі при влаштуванні шарів основи дорожнього одягу на об'єкті «Нове будівництво ЦПС 35/110 кВ «Яворівська ВЕС/СЕС» на території Яворівського району Львівської області, де роботи виконувались ТОВ «Балтом Україна». Встановлено, що використання регульованих термоактивованих відходів в кількості 8 мас.% порівняно з 4 мас.% портландцементу забезпечило ефективне укріплення шару основи дорожнього одягу.

Проведені лабораторні випробування дорожніх цементобетонів з регульованими термоактивованими відходами на базі ПП «Лабораторія ЗахідДорСервіс». Результати випробувань складів бетону з добавкою 5 мас.% РТАВ показали досягнення найвищих показників міцності на розтяг при згині у віці 28 діб. Показана економічна ефективність використання РТАВ в дорожніх цементобетонах. Встановлено, що очікуваний ефект від використання РТАВ як додаткового цементуючого матеріалу становить 94 тис. грн. при спорудженні 1 км цементобетонного покриття автомобільної дороги II категорії.

**Ключові слова:** термоактивовані відходи паперового виробництва, композиційні в'язучі системи, стабілізація та укріплення ґрунтів, деформаційні властивості ґрунту, додаткові цементуючі матеріали, гідратація, портландцемент, хімічні добавки, суперпластифікатор, доменний гранульований шлак, міцність на стиск і згин, тріщиностійкість цементобетону, дорожні покриття.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

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

1. Sobol K., Solodkyu S., Petrovska N., Belov S., Hunyak O. & Hidei V. (2020). Chemical



Composition and Hydraulic Properties of Incinerated Wastepaper Sludge. Chemistry & Chemical Technology. 14. 538-544.

2. Oleksii Hunyak, Volodymyr Hidei, Khrystyna Sobol, Nadiya Petrovska Valorization of Wastepaper Sludge Ash as Supplementary Cementitious Material in Concrete. Proceedings of EcoComfort 2022 (pp.94-100).
3. Sidun, Iurii, Vollis, Oleksiy, Hidei, Volodymyr and Bidos, Volodymyr. "Quick-traffic slurry surfacing mix with orthophosphoric acid" Production Engineering Archives, vol.27, no.3, 2021, pp.191-195. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.252>.

#### **Статті у наукових фахових виданнях України:**

4. Аналіз ефективності використання тонкомеленого доменного гранульованого шлаку в бетоні / Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, В. В. Гідей // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. — № 912. — С. 169–174.
5. Hidei, Volodymyr & Sidun, Iurii & Hunyak, Oleksii & Stanchak, Svitlana & Bidos, Volodymyr. (2020). Application of wastepaper sludge ash as mineral powder for hot asphalt concrete mix. Theory and Building Practice. 2020. 42-47. [10.23939/jtbp2020.02.042](https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.042).
6. Serhiy Solodkyy, Volodymyr Hidei, Iurii Sidun, and Yuriy Turba (2021) Using waste paper sludge ash (wsa) as a material for soil strengthening for the construction of layers of roadwear JTBP Volume 3, Number 1: 85-91 <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.085>.

#### **ABSTRACT**

Hidei V.V. Composite systems using thermally activated wastepaper for road construction. - Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 192. Construction and civil engineering ( 19 – Architecture and construction). - Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2023.

The dissertation work is devoted to solving the task of obtaining composite systems using thermally activated wastepaper for road construction and establishing the formation peculiarities of a complex of physical, mechanical and operational properties of pavement concrete and stabilized soils with improved properties.

In the first chapter, on the basis of a literature critical review, theoretical principles and experimental data on ways to improve the properties of pavement structure elements with the possibility of using wastepaper residues are considered. It is shown that road construction is a material- and energy-intensive industry that consumes a significant amount of natural resources, so it is viable to seek for partial replacement of natural materials with industrial waste, which at the same time will reduce the impact on the environment.

According to International Energy Agency (IEA), 11 million tons of wastepaper sludge are generated in the world annually. The optimal solution to the problem of their disposal is not only the solution of environmental problems, but also the complex use of the energy resource of its organic component as an alternative fuel, with the subsequent involvement of the generated heat-treated waste in the construction industry, in particular in road construction. It is noted that the resource value of wastepaper sludge also lies in the fact that the product of its incineration - thermally-activated wastepaper sludge (TAWP) - is a valuable mineral material of aluminosilicate composition, and exhibits hydraulic or pozzolanic activity, depending on the composition and firing technology. Thus, the use of TAWP in construction corresponds to the principles of the circular economy, in particular "Reduce - Reuse - Recycle" (3R) - "Reduction - Reuse - Recycling".

The latest trends in the use of TAWP as components of composite systems for road construction are considered and analyzed. According to the results of the review of literary sources, it was established that the arrangement of base course layers from soils treated with binders based on TAWP is effective and expedient.

The analysis of the known regularities of the structure formation in road construction materials makes it possible to study the scientific hypothesis about the feasibility of developing composite systems using regulated thermally-activated

wastepaper sludge in the construction of pavement layers, in particular cement concrete, aimed at forming their structure in order to achieve increased characteristics of strength, freeze-thaw resistance, waterproofness, fracture and abrasion resistance.

Chapter 2 "Methods of research and characteristics of materials" describes the methods of conducting experimental research and gives the raw materials characteristics. The general sequence of research is presented in the form of a block diagram. The physical and mechanical properties, mineralogical and oxide compositions of Portland cements of PrJSC "Volyncement", the chemical composition of TAWP and granulated blast furnace slag of the Kryvi Rig plant are given, as well as the properties of aggregates: granite from the quarry of Korosten, Zhytomyr region, and quartz sand from the Zhovkva quarry of Lviv region. For pavement concrete, air-entraining additive Microporan and superplasticizer Stachment 2570.

To study the effectiveness of using thermally activated wastepaper to stabilize the soil of the road subbase, four types of soil, which are most often found in Ukraine, were used, namely: loamy sand, sandy loam, clay loam and sandy clay.

Physical and mechanical tests of binders, soils and pavement cement concrete were carried out in accordance with current DSTU, ISO, EN and common methods. In particular, the California bearing ratio (CBR), swelling, maximum density according to the Proctor method, as well as compressive strength and freeze-thaw resistance of treated soils were determined. Research on the processes of structure formation in composite systems was carried out using modern methods of physical and chemical analysis (X-ray diffractometry, scanning electron microscopy, differential thermogravimetry, etc.).

In *chapter 3* "Investigation of the composition and features of hydration hardening of thermally-activated wastepaper" the physico-chemical and hydraulic properties of TAW were studied. It was established that thermally activated wastepaper contains  $\beta$ -C<sub>2</sub>S, C<sub>12</sub>A<sub>7</sub>, C<sub>3</sub>A, C<sub>2</sub>AS and is characterized by extremely rapid interaction with water, which is accompanied by heat release.

It is shown that a necessary condition that ensures hydration hardening of thermally activated wastepaper is the mandatory regulation of the processes of its early structure formation through the use of complex hardening-retarding additives, in

particular additives of the optimal composition of 7.0 wt%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  and 1.0 wt% tartaric acid, the use which provides increased strength indicators to obtain technologically justified hardening terms, and allows to obtain regulated thermally activated wastepaper (RTAWP).

It was established that the hydrate phase, which provides setting retardation and early strength of RTAWP, is ettringite  $\text{C}_3\text{A} \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . At the early stages of hydration in such systems, the hydroaluminate type of hardening prevails with the formation of conversionally stable hexagonal AFm-phases of calcium. During further hardening, calcium hydrosilicates are formed, which densifies the structure, helping to increase the strength of the binder based on regulated thermally activated wastepaper sludge.

The microstructure of hydrated RTAWP is characterized by a significant variety of forms - finely crystalline, weakly crystalline and well-crystallized particles of various sizes.

In chapter 4 "Using regulated thermally activated wastepaper for soil strengthening" the compositions of soils stabilized by RTAWP were developed and their construction and technical properties were investigated. The maximum density of dry soil at optimal humidity was determined, which for clay soil is 14.1 wt.%, for loamy soil - 19.1 wt.%, for sandy soil - 13.8 wt.%, and for sand - 7.2 wt.%. To study the possibility of replacing Portland cement with regulated thermally activated wastepaper in soil mixtures, RTAWP was used in the amount of 8-14 wt.%, and Portland cement PC II/A-III 500 was used in the amount of 6-10 wt.% for comparison.

To test the developed soil mixtures, studies of the effect of the amount and type of binder on the properties of treated soils were carried out. It was found that the swelling of stabilized soils decreases regardless of the type of binder, while the bearing capacity, determined on the basis of the CBR coefficient, for reinforced soils compared to unreinforced ones increases with the increase in the content of binders, especially RTAWP.

As the conducted studies have shown, the use of RTAV in the amount of 14 wt.% instead of 10 wt.% PC contributes to the process of directional structure formation, which

ensures the strengthening of the subbase layer and the achievement of high values of freeze-thaw resistance and strength with the obtaining of reinforced soil grades M10, M20 and M40. The obtained test results correlate well with microstructure studies, characterized by the presence of semi-ordered fibrous crystals of RTAWP hydration products, which envelop soil particles, ensuring the formation of a three-dimensional force framework.

Chapter 5 "Using regulated thermally activated wastepaper as supplementary cementitious materials in pavement cement concrete" is devoted to the development, optimization of the composition and determination of the properties of concrete containing RTAWP for road construction. The effectiveness of the use of RTAWP for the activation of GBFS, which occurs according to sulfate and partially alkaline mechanisms, has been established. The results of physical and mechanical tests of samples of the composite system "GBFS-RTAWP" showed that the highest early strength - 2.23 MPa in bending and 7.6 MPa in compression - is achieved by samples with the maximum content of RTAWP – 70 wt.%. This is explained by the rapid hydration of aluminate phases in the composition of RTAWP, which provides strength during early structure formation. However, the highest compressive strength (38.3 MPa) and, especially, flexural strength (4.6 MPa) in the late stages of hydration, when the hydrosilicate type of hardening prevails, are characterized by the samples with the ratio GBFS:RTAWP =70:30.

Studies of the phase composition of the developed composite system indicate the formation of hydrosilicates CSH(B), as well as calcium hydroaluminates  $C_4AH_{13}$ , which, interacting with gypsum present in the RTAWP composition, form calcium hydrosulfoaluminate  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  already in the initial period of hydration. This correlates well with the results of scanning electron microscope studies.

The paper presents the results of a study of the properties of slag-containing Portland cements CEM II/A-S 42,5 and CEM II/B-S 32,5, which are used in road construction technology, adding RTAWP as a supplementary cementitious material (SCM). It is shown that among the studied mixes of composite systems with a binder content of 5.0 and 10.0 wt.%, the highest strength values, both for bending and

compression, were achieved by samples containing 5 wt.% of Portland cements CEM II/A-S 42,5 and CEM II/B-S 32,5 were replaced by 5 wt.% RTAWP.

It was established that the introduction of RTAWP causes some increase in the standard consistency of the cement paste and shortens the setting time. However, the strength of cements, determined according to EN 197, indicates the feasibility of using RTAWP in road construction. Despite slightly lower strength in the early stages of hardening, at the age of 28 days, compositions with a content of 5 wt.% RTAV are characterized by the highest flexural strength  $R_{tb}=7.4\div 7.8$  MPa.

To determine the optimal ratio between the superplasticizer Stachement 2570 and the supplementary cementitious material RTAWP, the influence of composition factors on the physical and mechanical characteristics of cement concrete was determined by the method of mathematical planning of the experiment. The analysis of the response surfaces of compressive and flexural strength show that the use of 5 wt. % RTAWP and 0.8 wt.% of Stachement 2570 superplasticizer provide active kinetics of early strength gain and the highest flexural strength of concrete, which corresponds to class  $B_{tb}$  6.4, and achievement of concrete class C 40/50 in terms of compressive strength.

Rigid concrete mixtures with a nominal composition of 1:1.9:3.8 with a content of 0.8 wt.% superplasticizer and 0.2 wt.% Microporan air-entraining admixture were developed. It is shown that for samples with an additive of 5 wt.% RTAWP based on CEM II/B-S 32,5 with an entrained air content of 5.2 vol.%, the flexural strength at the age of 180 days is 10.1 MPa, which is the highest indicator among studied samples. According to the results of water absorption, depth of water penetration and open porosity, it is shown that the introduction of RTAWP densifies the structure of concrete and reduces its permeability.

The effect of RTAWP on the strength and energy characteristics of fracture resistance of developed pavement concretes was studied. The analysis of the obtained complete state diagrams of concrete shows a positive effect of adding 5 wt.% RTAWP on the performance of concrete both in the pre-critical ( $G_i=225-230$  J/m<sup>2</sup>) and supercritical ( $G_f=650-607$  J/m<sup>2</sup>) stages, and are also characterized by the highest static critical stress intensity factors  $K_{i}=0.96-0.98$  MPa·m<sup>1/2</sup>. It is noted that despite the

somewhat lower physical and mechanical properties of concrete based on CEM II/B-S 32,5 with 10 wt.% RTAWP, its fracture resistance characteristics exceed both compositions without additional cementing materials, which confirms the synergy of the RTAWP-GBFS system in the context of fracture mechanics.

It was established that concretes with an optimal content of RTAWP are characterized by significant resistance to the action of alternating freezing and thawing, achieving the F300 frost resistance mark and abrasion resistance of  $G=0.29$  g/cm<sup>2</sup>.

The *sixth chapter* presents the results of experimental and industrial testing of composite systems using thermally activated wastepaper sludge. The developed RTAWP were used as binders during the construction of base layers at the facility "New construction of the 35/110 kV TPS "Yavorivska WPS/SPS" in the territory of the Yavoriv district of the Lviv region, the contractor was Baltom Ukraine LLC.

Keywords: thermally activated paper waste, composite binding systems, stabilization and strengthening of soils, deformation properties of soil, supplementary cementitious materials, hydration, Portland cement, chemical admixtures, superplasticizer, granulated blast furnace slag, compressive and flexural strength, fracture resistance of cement concrete, road pavement.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	18
РОЗДІЛ 1_СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ	24
1.1 Відходи паперового виробництва та проблеми їх використання.....	24
1.2 Стабілізація та укріплення ґрунтів для доріг.....	28
1.3 Використання відходів паперового виробництва для цементних дорожніх бетонів .....	35
1.4 Теоретичні передумови та наукова гіпотеза досліджень.....	39
РОЗДІЛ 2 МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ.....	41
2.1 Фізико-механічні випробування.....	42
2.2 Фізико-хімічні методи досліджень.....	46
2.3 Вихідні матеріали.....	47
РОЗДІЛ 3.ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ГІДРАТАЦІЙНОГО ТВЕРДНЕННЯ ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ПАПЕРОВОГО ВИРОБНИЦТВА.....	54
3.1 Вивчення фазового складу термоактивованих відходів .....	54
3.2 Дослідження процесів структуроутворення при гідратації термоактивованих відходів .....	61
РОЗДІЛ 4 ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ УКРІПЛЕННЯ ГРУНТІВ .....	70
4.1 Визначення властивостей ґрунтів .....	71
4.2 Підбір складів ґрунтових сумішей.....	74
4.3 Визначення властивостей укріплених ґрунтів.....	76
4.3.1 Визначення несучої здатності та показника набухання ґрунтів.....	76
4.3.2 Визначення міцності та деформативності укріплених ґрунтів .....	78
4.3.3 Визначення морозостійкості укріплених ґрунтів.....	84
РОЗДІЛ 5 ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ЯК ДОДАТКОВИХ ЦЕМЕНТУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ В ДОРОЖНІХ	



ЦЕМЕНТОБЕТОНАХ .....	89
5.1 Дослідження процесів структуроутворення в системі «доменний гранульований шлак - регульовані термоактивовані відходи» .....	89
5.2 Використання регульованих термоактивованих відходів у шлаковмісних портландцементних системах .....	93
5.3 Оптимізація складів дорожнього цементобетону з регульованими термоактивованими відходами .....	95
5.4 Вплив регульованих термоактивованих відходів на властивості дорожніх цементобетонів.....	100
<b>РОЗДІЛ 6 ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В КОНСТРУКЦІЯХ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ .....</b>	<b>111</b>
6.1 Промислова апробація регульованих термоактивованих відходів для укріплення ґрунтів .....	111
6.2 Лабораторні випробування дорожніх цементобетонів з регульованими термоактивованими відходами паперового виробництва .....	113
<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ .....</b>	<b>118</b>
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....</b>	<b>121</b>
<b>ДОДАТКИ.....</b>	<b>132</b>

## ВСТУП

**Актуальність теми.** Розвиток сучасної транспортної інфраструктури передбачає підвищення вимог до дорожнього одягу як для швидкісних автомагістралей, так і доріг місцевого значення. В цьому напрямку особливі вимоги ставляться до раціонального добору дорожньо-будівельних матеріалів, які визначають довговічність і надійність функціонування та експлуатації дорожнього покриття.

Дорожнє будівництво є матеріало- і енергетично затратною галуззю, яка споживає значну кількість природних ресурсів. Тому закономірним є прагнення замінити частину природних матеріалів відходами виробництв. В сучасних умовах це є запорукою забезпечення стабільності еколого-економічної системи держави. Про це чітко зазначається в Європейській рамковій директиві щодо відходів 2008/98/ЄС (Європейський парламент 2008р.) та в концепції Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг України.

В сучасних реаліях портландцемент розглядається як основний матеріал для виробництва цементобетону. Однак вартість його постійно зростає, тому значний практичний інтерес викликає застосування в дорожньому будівництві додаткових цементуючих матеріалів, зокрема продуктів термообробки відходів паперового виробництва з макулатури.

За даними Міжнародного енергетичного агенства (ІЕА) в світі щорічно продукується біля 11 млн.т. відходів паперового виробництва - макулатурного скопу. Оптимальним розв'язанням проблеми їх утилізації є не тільки вирішення екологічних проблем, але і комплексне використання енергетичного ресурсу його органічної складової як альтернативного палива з наступним залученням утворених термооброблених відходів у будівельну індустрію, зокрема у дорожнє будівництво.

Отже, використання термооброблених відходів паперового виробництва є перспективним напрямом економії паливно-енергетичних та зменшення витрат

природних ресурсів в дорожніх технологіях. Такий підхід відповідає пріоритетним принципам рівномірного і сталого розвитку галузі, спрямованим на створення екологічно чистих та малоенергоємних технологій.

Таким чином, використання термооброблених відходів паперового виробництва відкриває додаткові шляхи до розроблення нових композиційних в'язучих систем для дорожнього будівництва з покращеними експлуатаційними властивостями дорожнього одягу, що є актуальним завданням в напрямку реалізації національної транспортної програми України.

**Мета роботи та завдання досліджень.** Розроблення композиційних систем з покращеними фізико-механічними та експлуатаційними властивостями для одержання укріплених шарів земляного полотна та шарів дорожнього одягу шляхом використання термоактивованих відходів паперового виробництва.

Для досягнення поставленої мети здобувачем вирішувались такі завдання:

- провести аналіз теоретичних засад та експериментальних даних щодо шляхів покращення властивостей елементів конструкції дорожнього одягу з можливістю використання відходів паперового виробництва;
- дослідити властивості і фазовий склад термооброблених відходів паперового виробництва;
- встановити особливості процесу гідратації термоактивованих відходів та регулювання властивостей комплексними поліфункціональними добавками;
- дослідити вплив регульованих термоактивованих відходів на процеси структуроутворення різних типів ґрунтів при їх стабілізації та укріпленні;
- визначити особливості взаємодії в системі доменний гранульований шлак - регульовані термоактивовані відходи;
- розробити та оптимізувати за критерієм міцності склади цементних дорожніх бетонів з використанням регульованих термоактивованих відходів в якості додаткових цементуючих матеріалів та дослідити їх фізико-механічні та експлуатаційні властивості
- провести виробничі випробування укріплених ґрунтів та дорожніх цементобетонів з використанням регульованих термоактивованих відходів.

*Об'єктом дослідження є регулювання властивостей цементних дорожніх бетонів та укріплених ґрунтів з використанням термоактивованих відходів і встановлення особливостей формування комплексу їх фізико-механічних та експлуатаційних властивостей.*

*Предметом дослідження є цементні дорожні бетони та укріплені ґрунти з покращеними властивостями, отримані шляхом використання регульованих термоактивованих відходів*

### **Наукова новизна одержаних результатів:**

- Теоретично обґрунтовано і експериментально підтверджено необхідність направленою регулювання процесів раннього структуроутворення термоактивованих відходів паперового виробництва комплексними хімічними добавками поліфункціональної дії з подальшим їх використанням в дорожньому будівництві.

- Подальший розвиток отримали принципи модифікування в'язучих композицій з додатковими цементуючими матеріалами шляхом раціонального проектування їх властивостей.

- Розкрито закономірності процесів направленою структуроутворення в системі «ґрунт – регульовані термоактивовані відходи – вода», що приводить до укріплення і зміцнення ґрунтів.

- Вперше встановлена можливість активізації доменних гранульованих шлаків термоактивованими відходами паперового виробництва в безклінкерних композиціях за рахунок утворення структурноактивних гідратних фаз.

- Розкрито особливості структуроутворюючої ролі регульованих термоактивованих відходів як додаткового цементуючого матеріалу в складі дорожнього цементобетону.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

- розроблено склади для укріплення ґрунтів з заміною портландцементу регульованими термоактивованими відходами, які характеризуються підвищеною міцністю та морозостійкістю;

- у виробничих умовах ТОВ «Балтом Україна» проведено стабілізацію ґрунту, укріпленого регульованими термоактивованими відходами;
- проведено дослідження дорожніх цементобетонів з добавкою регульованих термоактивованих відходів в якості додаткових цементуючих матеріалів, що характеризуються підвищеними показниками міцності.

Результати дисертаційної роботи використовуються в навчальному процесі Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні дисципліни «Виробничі підприємства та дорожньо-будівельні матеріали» для 1-го освітнього рівня «бакалавр» та «Сучасні технології і матеріали в дорожньому будівництві» для 2-го освітнього рівня «магістр» за освітньою програмою «Автомобільні дороги та аеродроми».

Результати дисертаційної роботи використовуються при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

### **Особистий внесок здобувача**

Особистий внесок здобувача полягає в аналізі літературних джерел, проведенні експериментальних досліджень, обробленні та інтерпретації одержаних даних. Постановка завдання, планування програми досліджень, формулювання основних положень та висновків здійснювалося під керівництвом наукового керівника – д.т.н., проф. Соболь Х.С., за наукового консультування к.т.н., доцента Гуняка О.М. Результати наукових досліджень, представлені в дисертаційній роботі, отримані автором особисто. В роботах, які опубліковані у співавторстві, автору належить: [1] – дослідження складу та гідравлічних властивостей термооброблених відходів паперового виробництва; [2] – вивчення можливості використання регульованих термоактивованих відходів паперового виробництва як додаткового цементуючого матеріалу у дорожніх бетонах; [3] – проведено дослідження фізико-технічних показників тонкошарових дорожніх покриттів; [4] – проведено аналіз ефективності використання тонкомеленого доменного гранульованого шлаку в бетоні; [5] – проведено випробування асфальтобетонів з використанням термоактивованих відходів в якості

мінерального порошку; [6] – досліджено фізико-механічні властивості укріплених ґрунтів для будівництва шарів дорожнього одягу з використанням термооброблених відходів паперового виробництва.

**Публікації.** За темою дисертації опубліковано 6 наукових праць, з них 3 статті у наукових фахових виданнях України, 3 – у виданнях, що включені до міжнародної наукометричної бази даних Scopus.

**Обсяг і структура дисертації.** Дисертація складається з вступу, шести розділів, загальних висновків, списку використаних джерел із 113 найменувань та 4 додатків. Робота викладена на 136 сторінках, у тому числі 98 сторінок основного тексту, 34 таблиці, містить 34 рисунки, 11 сторінок списку використаних джерел та додатків.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- ТАВ – термоактивовані відходи паперового виробництва;
- РТАВ – регульовані термоактивовані відходи паперового виробництва.
- ПЦ – портландцемент;
- ДГШ – доменний гранульований шлак;
- SCM – додатковий цементуючий матеріал;
- HRB – дорожнє гідравлічне в'язуче;
- CBR – каліфорнійський коефіцієнт несучої здатності;
- В/Ц – водоцементне відношення;
- $f_{ctb}$  – міцність на розтяг при згині, МПа;
- $f_{cm}$  – міцність при стиску, МПа;
- СП – суперпластифікатор;
- ОЦКП – ортогональне центральнo-композиційне планування

## РОЗДІЛ 1

### СТАН ПИТАННЯ ТА ТЕОРЕТИЧНІ ПЕРЕДУМОВИ ДОСЛІДЖЕНЬ

#### 1.1 Відходи паперового виробництва та проблеми їх використання

Важливу роль у досягненні сталого розвитку держави і суспільства відіграє збалансоване використання природних ресурсів і відходів виробництв. В сучасних умовах це є запорукою збереження стабільності еколого-економічної системи в усіх галузях промисловості і в будівництві зокрема.

Основний вид відходів паперового виробництва – макулатурний скоп - утворюється в результаті вторинної переробки макулатури. Скоп являє собою суміш з вологістю понад 80%, яка утворюється в процесі механічної очистки стічних вод при виробництві паперу і картону з макулатури. Після зневоднення отримується осад з вмістом сухої речовини, що складається з 50-65 мас.%, до складу якої входить 56-60 мас.% целюлози та 35-50 мас.% мінеральних наповнювачів – каоліну та крейди.

Макулатурний скоп належить до багатотонажних відходів промисловості. Так, за даними Міжнародного енергетичного агенства (ІЕА) світова паперово-целюлозна промисловість продукує щорічно приблизно 11 мільйонів тонн макулатурного скопу. Середньорічний обсяг скопу, що утворюється на найбільшому в Україні ПрАТ «Київський КПК», який переробляє близько 30% усієї макулатури в державі, становить біля 45 тис. тонн [1]. Більша частина відходів паперового виробництва захоронюється та зберігається у відвалах, породжуючи проблему негативного впливу на довкілля, забруднюючи атмосферу та підземні ґрунтові води [2].

Таким чином, накопичення великого обсягу відходів паперового виробництва, які потребують належного поводження, є серйозною проблемою. Це призвело до пошуку ефективних з еколого-економічної точки зору способів їх утилізації та переробким [3,4].

В світовій практиці в результаті численних досліджень сформувались два основних напрямки повторної переробки макулатурного скопу. Перший метод



передбачає залучення в переробку відходів у їх первинному вигляді, тоді як інший – застосування термооброблених відходів[5].

Обидва ці напрямки використовуються і мають розвиток у відповідних галузях промисловості як за кордоном, так і в Україні. Так, Державним науково-дослідним інститутом паперу України розроблено технічні умови на макулатурний скоп ТУ У 37.2-02126811-081:2004, які передбачають його використання у вигляді висушеного, подрібненого, або розмеленого матеріалу в різних галузях промисловості [6].

Існуючі напрями переробки первинного вихідного макулатурного скопу ґрунтовані на використанні армуючих властивостей його волокнистих компонентів та на наявності у нього в'язучих властивостей. В'язучі властивості скопу зумовлені хімічною будовою та адгезійно-сорбційними властивостями його складників. Ґрунтуючись на дослідженнях Р.Ф. Рунової, Л.Й. Дворкіна та ін. [7], макулатурний скоп може бути віднесений до в'язучих контактено-конденсаційного тверднення. До цієї групи належать також в'язучі матеріали з аморфною та нестабільною кристалічною структурою, здатні конденсуватись при виникненні контактів між частинками на відстані дії поверхневих сил. В результаті сумісної дії цих чинників утворюються жорсткі зв'язки між волокнами.

Серед чисельних способів переробки макулатурного скопу значна увага приділяється його використанню у будівельній галузі. Так, відомий цілий ряд напрямків його використання у виробництві конструктивно-теплоізоляційних матеріалів, легких заповнювачів, теплоізоляційно-оздоблювальних матеріалів, в керамічній промисловості як вигораючої добавки, в бетонних сумішах в якості пластифікуючої добавки та ін. [8].

На основі досліджень реологічних, технологічних та сорбційних властивостей макулатурного скопу показана доцільність його використання в якості органічного в'язучого та сорбційно-активного наповнювача для виробництва жорстких теплоізоляційних та конструкційно-теплоізоляційних матеріалів. Українським науково-виробничим об'єднанням целюлозно-паперової промисловості розроблено склад для виготовлення волокнистих плит. Використання відходів паперообробки

для виробництва теплоізоляційних волокнистих плит є вигідним як з екологічної, так і з економічної точки зору. Розроблений склад для їх виготовлення містить 60-90% відходів паперообробки, забезпечує високу механічну міцність та знижує займистість матеріалу. Теплоізоляційні плити на основі відходів паперообробки мають теплопровідність від 0,063 до 0,087 Вт/(м·К), що дозволяє знизити витрати на опалення та забезпечити комфортний мікроклімат у приміщенні [8].

Скоп використовується також при виробництві гіпсо-волокнистих плит в якості наповнювача замість макулатури. Волокнисті частинки скопу покращують механічні властивості матеріалу, забезпечують йому пористу структуру та низьку щільність [9]. Так, при вивченні впливу ТАВ на властивості виробів з гіпсокартону встановлено, що введення 10% відходів покращує їх механічні властивості та вогнестійкість, призводить до зниження водопоглинання [2].

Використання макулатурного скопу у виробництві аглопоритового гравію на основі зол ТЕС є важливим кроком в напрямку покращення його якості. Завдяки своїй невисокій густині, пластичності та високим сорбційним властивостям, макулатурний скоп полегшує грудкування зольної шихти, що в процесі виробництва підвищує міцність зерен як вологого, так і сухого аглопоритованого гравію. Більше того, на його основі можна одержати легкі бетони класу В 12,5... В 20, що мають середню густину від 1350 до 1800 кг/м<sup>3</sup> [2].

З огляду на той факт, що до складу мінеральної частини скопу входять карбонатний (крейда) і глинистий (каолін) компоненти, авторами на чолі з В.А. Свідерським [10] запропоновано використовувати макулатурний скоп в складі сировинної суміші для виробництва портладцементного клінкеру.

На відміну від розглянутих методів переробки «сирого» макулатурного скопу, використовується також принципово інший спосіб застосування відходів, який ґрунтується на попередній термообробці скопу в процесі його спалювання. Такий підхід є обґрунтованим і доцільним з огляду на великий вміст в складі скопу органічних горючих матеріалів [11,5].

Як показує світовий досвід [12, 13], ресурсна цінність макулатурного скопу

полягає в значній мірі саме в застосуванні його в якості нетрадиційного альтернативного палива. Адже відновлювальна енергетика є важливою ланкою в сучасному енергетичному комплексі розвинутих країн. При цьому одним із важливих джерел є використання енергетичного потенціалу органічних відходів виробництв, в тому числі, відходів паперового виробництва.

Довший час використання макулатурного скопу в якості альтернативного палива стримувалось його дисперсністю, високою вологістю, низькою ефективністю згорання. З часом, завдяки розробленим методам підготовки скопу до термічної утилізації та удосконалення конструкції теплових агрегатів [14, 15] ця проблема поступово втрачає свою гостроту.

Зарубіжними авторами Liu M. Та ін. [16] показано, що оптимальним шляхом повторної паперообробки макулатурного скопу є комплексне використання паливного ресурсу його органічної складової з отриманням в результаті спалювання термоактивованих золо-шлакових залишків, які знаходять своє використання в промисловості, в тому числі і в будівельній індустрії.

Зважаючи на присутність алюмосилікатного компоненту – каоліну в мінеральній частині скопу, режим і температура його спалювання є ключовим фактором, який впливає на мінералогічний склад і відповідно на властивості термооброблених відходів [17].

Тому, залежно від особливостей складу макулатурного скопу та температури його спалювання, властивості і, відповідно, напрямки використання термооброблених відходів можуть суттєво змінюватися, в зв'язку з чим все частіше привертають увагу дослідників і виробничників. Так, останнім часом застосуванню термоактивованих відходів паперового виробництва у будівельній галузі приділяється все більше уваги.

Kubba H. [18] було досліджено ефективність використання ТАВ у будівельних розчинах для заміни частини піску, а також для заміни частини цементу. Встановлено, що додавання ТАВ до складу будівельних розчинів підвищує його міцність, покращує легкоукладальність, зменшує усадку розчину та його

водопоглинання [19].

В роботі Zhu С. [20] показано, що часткова заміна золи винесення на термоактивовані відходи у фіброцементних плитах дозволяє покращити механічні властивості виробів та зменшити їх водопоглинання.

Встановлена ефективність використання термоактивованих відходів паперового виробництва в складі асфальтобетонних тонкошарових покриттів, що покращує їх водостійкість, підвищує жорсткість, міцність та довговічність дорожнього покриття [21,22,23].

Використання добавки термоактивованих відходів паперового виробництва в технології пінобетону дозволяє покращити фізико-механічні, тепло- звукоізоляційні властивості виробів[24].

Термооброблений макулатурний скоп можна використовувати також у виробництві конструкційно-теплоізоляційного легкого бетону - скопобетону. З нього можна виготовляти стінові блоки класом не менше В12,5 з теплопровідністю 0,15 Вт/(м·К) та морозостійкістю та F 25. Крім того, витрату портландцементу для виготовлення скопобетонних блоків можна довести до 200 кг/м<sup>3</sup> [2,8].

При дослідженні часткової заміни цементу в бетонних сумішах на термоактивовані відходи паперової промисловості, встановлено можливість їх використання в якості додаткового цементуючого матеріалу, що дозволяє зменшити витрату портландцементу [25].

Однак, не дивлячись на різноманітність способів утилізації та повторного перероблення макулатурного скопу та враховуючи великий обсяг їх утворення, робота по пошуку нових ефективних методів використання відходів паперового виробництва залишається основною проблемою, що має високий світовий пріоритет.

## **1.2 Стабілізація та укріплення ґрунтів для доріг**

Дорожня інфраструктура є важливим компонентом економіки будь-якої країни. Однак, ґрунтові умови можуть створювати проблеми, такі як нестабільність,

осідання та пошкодження доріг. У таких випадках стабілізація та укріплення ґрунтів виявляються необхідними для забезпечення довговічності та надійності дорожньої інфраструктури [26]. Ґрунтові умови можуть значно впливати на стан доріг, адже погіршення стану ґрунтового шару, такі як розм'якшення, розмивання або осідання, можуть спричинити появу тріщин, провалів, нерівностей на поверхні дороги, а також збільшити витрати на ремонт та утримання дороги, а також призвести до проблем з транспортним рухом [27].

Зазвичай вважається, що ґрунтовий шар не сприймає значного транспортного навантаження порівняно з іншими конструктивними елементами дорожнього одягу. Однак несуча здатність і жорсткість ґрунту земляного полотна є основними факторами, які впливають на товщину дорожнього одягу [28]. Основне покриття може складатися з природного або ущільненого ґрунту, щоб відповідати вимогам щодо несучої здатності [29]. Основа підтримує конструкцію покриття та сприймає розподілене навантаження від верхніх шарів. Міцна основа забезпечує надійну жорсткість і підтримку, що зменшує вимоги до товщини покриття. Крім того, довгострокові характеристики дорожнього покриття значною мірою залежать від довговічності основного земляного полотна. Деформація земляного полотна може спричинити руйнування дорожнього покриття, наприклад, значну колійність, вибоїни та тріщиноутворення [30]. Вплив може посилюватися за несприятливих кліматичних умов, включаючи часті опади, сольову корозію та сезонне замерзання та відтавання.

Тип ґрунту, вологість, температура та надмірне навантаження є чотирма важливими факторами, які можуть призвести до погіршення стану земляного полотна та його руйнування. Зокрема, сильні та тривалі опади підвищують вологість ґрунту земляного полотна, спричиняючи його перенасиченість вологою. Дрібні частинки ґрунту флокулюються у воді, зчеплення між частинками значно знижується, і, як наслідок, зменшується несуча здатність і жорсткість конструкції дорожнього одягу. Дисперсні ґрунти, такі як мул і глина, чутливі до циклів поперемінного зволоження та висихання. У деяких випадках значення CBR і

міцність на стиск можуть знизитися на 90% при насиченні водою [31, 32]. Термічна дія є ще одним вирішальним впливом на ґрунт земляного полотна. Міцність і модуль пружності ґрунтів земляного полотна підвищуються взимку внаслідок промерзання, але значно знижуються в період відтавання [33].

У деяких випадках, коли природній ґрунт характеризується незадовільними показниками несучої здатності, стабілізація та укріплення ґрунтів земляного полотна є ефективним методом підвищення довговічності усієї конструкції дороги. Стабілізація ґрунту – це комплекс заходів, спрямованих на надання ґрунту стійкого стану, довговічності, збереження незмінних властивостей за допомогою стабілізатора. Укріплення ґрунту – це заходи, спрямовані на підвищення механічної міцності та водостійкості ґрунту [34]. Вони включають ряд послідовних технологічних операцій, що забезпечують в результаті активного впливу на ґрунт добавок в'язучих та інших речовин – високу щільність, міцність та довговічність як в сухому, так і в водонасиченому стані. В результаті багаторічних лабораторних випробувань і різнобічних дослідів у виробничих умовах розроблено і широко застосовуються на практиці ряд різноманітних методів укріплення ґрунтів [35].

Так, механічна стабілізація передбачає змішування двох або більше типів ґрунту з метою покращення властивостей ґрунтового шару, тоді як в інших методах використовується додавання певних добавок, таких як цемент, вапно, розчини, органічні в'язучі, хімічні добавки тощо, щоб зміцнити ґрунт, покращити його фізико-механічні та експлуатаційні властивості, зробити його придатним для використання в якості земляного полотна, додаткової основи, а також для ряду інших інженерних застосувань. Кожен з різних методів стабілізації ґрунту має свої унікальні переваги та обмеження, які роблять їх ідеальними для певних інженерних цілей, але непридатними для інших. Основні властивості ґрунту, які цікавлять інженерів, це стабільність об'єму, міцність, деформативність, проникність і довговічність [37, 38]. Однак основними факторами, які визначають доцільність використання певного методу стабілізації ґрунту, є його мінеральний та гранулометричний склад.

Багато з важливих інженерних властивостей глинистих ґрунтів покращуються за допомогою додавання вапна [39]. Однак властивості таких сумішей ґрунту та вапна відрізняються і залежать від характеру глинистого ґрунту, типу та тривалості процесу догляду, а також від методу та якості спорудження основи.

При додаванні вапна до глинистих ґрунтів, іони кальцію адсорбуються глинистими мінералами. Додавання вапна сприяє покращенню легковкладальності та здатності ґрунту до ущільнення, але не викликає збільшення міцності композиту. Вапно, додане в надлишку після завершення гасіння, використовується у процесі цементації, але ефективність стабілізації вапном залежить від продуктів реакції, які утворюються в результаті взаємодії вапна з глинистими мінералами [40].

При цементній стабілізації портландцемент змішується з ґрунтом, а також водою, і ущільнюється для отримання матеріалу з підвищеною міцністю, довговічністю та мінімальними змінами вологості [41]. На даний час обробка портландцементом довела свою ефективність при стабілізації ґрунтів всіх типів [42], за винятком глини. Але наявність певних домішок у ґрунті зменшує ефективність цементної стабілізації. Наприклад, присутність сульфатів у ґрунті робить його непридатним для укріплення за допомогою цементу [43].

Останнім десятиліттям в Україні набуває поширення хімічна стабілізація, яка включає використання хімічних речовин [44] та емульсій [45, 46], як засобів компактизації ґрунтів, в'язучих матеріалів та відштовхувачів вологи, а також для зміни поведінки глинистих ґрунтів під навантаженням [47]. Цей спосіб передбачає глибоке змішування (Deep soil stabilization) та ґрунтове ін'єктування. Хімічна стабілізація може бути корисною для контролю пилоутворення на дорогах та автомагістралях [48], особливо на дорогах з покриттям перехідного типу, для контролю водної ерозії, а також для фіксації і контролю витоків відходів та вторинних матеріалів у ґрунтові води [49].

Типова глибина обробки при стабілізації земляного полотна становить від 200 мм до 300 мм. Економічна ефективність досягається, коли стабілізований шар зменшує необхідну товщину шару основи або додаткової основи з ущільнених

кам'яних порід та потребу в заповнювачах. Така конструкція часто зустрічається при зведенні нових покриттів [50].

Існують різні методи стабілізації, прийняті для підвищення міцності слабого земляного полотна, забезпечення дренажу дорожнього одягу, а також для розподілу навантаження. Одним із найбільш рентабельних методів є змішування ґрунту та гідралічного в'язучого в польових умовах. Гідратована суміш функціонує як постійний зв'язаний шар, розподіляючи навантаження на природне ґрунтове покриття. В результаті багаторічних лабораторних досліджень і різнобічних дослідів у виробничих умовах розроблені і широко застосовуються на практиці ряд досить різноманітних методів укріплення ґрунтів. Найпоширенішим методом є зміцнення ґрунтів мінеральними в'язучими у вигляді цементу або вапна, що характеризується формуванням гідратаційної структури.

При встановленні придатності того чи іншого виду ґрунту для укріплення в'язучими матеріалами необхідно враховувати і направлено використовувати їх мінералогічний і хімічний склади. При цьому варто відзначити, що зміна гранулометричного складу ґрунту можлива, а іноді і вигідна з економічної точки зору. Водночас, зміна мінералогічного і хімічного складів ґрунтів є задачею, яку майже неможливо виконати. Ґрунти, особливо глинисті та їх різновиди, являють собою полідисперсні полімінеральні системи. Мінералогічний і хімічний склади ґрунтів впливають не тільки на фізичні властивості і ступінь їх стійкості, але і на результати укріплення.

Оскільки зміцнювані ґрунти, в більшості випадків, є тонкодисперсними, полімінеральними багатофазними системами, які здатні активно реагувати з продуктами гідратації цементу, міцність цементоґрунту при однаковій кількості цементу але їх різному складі може суттєво відрізнятись. Це повністю підтверджує положення про принципову можливість регулювання процесів структуроутворення, усунення причин, які викликають зниження міцності і створення оптимальних умов і факторів, які позитивно впливатимуть на її зміцнення [51].

Останніми роками було проведено багато досліджень щодо використання



альтернативних в'язучих та мінеральних добавок для укріплення ґрунту. У багатьох випадках це побічні продукти промисловості, наприклад, зола-винесення [52], зола біомаси стічних вод [53, 54], кремнезем [55], червоний шлам [54], зола рисового лушпиння [56] та мінеральні в'язучі речовини, спеціально розроблені для обробки ґрунту.

Однак досвід показує, що цемент більше підходить для укріплення ґрунтів з низькою пластичністю (індекс пластичності  $<10$ ), тоді як вапно рекомендується для укріплення ґрунтів з більшою пластичністю. Проте в деяких джерелах [31, 40] стверджується, що цемент можна використовувати і для ґрунтів з індексом пластичності до 50, особливо в аспекті підвищення міцності.

На сьогодні портландцемент є найпоширенішим в'язучим для стабілізації ґрунту земляного полотна в Україні. З екологічної точки зору, виробництво портландцементу спричиняє приблизно 5-8% загальних антропогенних викидів вуглецю [57]. Загалом, з кінця 1950-х років щорічні антропогенні глобальні викиди вуглецю різко зростають. Постачання сировини, транспортування та виробництво цементу споживає значну кількість енергії та призводить до значних викидів парникових газів (наприклад,  $\text{CO}_2$ ). Очевидно, що, будучи побічними продуктами та промисловими вторинними матеріалами, додаткові цементуючі матеріали (Supplementary cementitious materials - SCM) та змішані цементи потребують менше енергії для виробництва та транспортування. Таким чином, використання SCM призводить до значного зменшення вуглецевих викидів. Оскільки використання дорожнього гідравлічного в'язучого (Hydraulic Road Binder - HRB) може забезпечити еквівалентні показники якості укріпленого шару, як при обробці аналогічною кількістю цементу, його можна розглядати як «зелене рішення» для будівництва доріг.

Дорожнє гідравлічне в'язуче визначено у європейському стандарті [58] як «стабілізатор заводського виробництва для обробки основ доріг, додаткових шарів основи, а також земляних робіт». Використання HRB для стабілізації дорожнього покриття широко поширене в європейських країнах, включаючи Францію,

Німеччину, Великобританію, Чехію та Польщу [59]. Основна відмінність між HRB і портландцементом полягає в тому, що HRB зазвичай включають високий вміст і велику різноманітність SCM. Використання HRB для укріплених дорожніх ґрунтових сумішей забезпечує властивості, подібні до оброблених цементом матеріалів [42]. Але на відміну від портландцементу, присутність SCM в складі в'язучих зумовлює повільний і тривалий набір міцності, але з меншою схильністю до деформацій усадки [60].

Однак, базуючись на різних хімічних основах, SCM мають також різні властивості. Це суттєво впливає на експлуатаційні характеристики HRB та укріплених ним ґрунтів. Розрізняють швидкотверднучі та нормальнотверднучі дорожні гідравлічні в'язучі за вмістом цементного клінкеру та часом тужавіння. HRB з вмістом клінкеру понад 20% і початком тужавіння менше 150 хвилин класифікуються як HRB швидкого твердіння в EN 13282-1. Водночас, EN 13292-2 стандартизує HRB з початком тужавіння понад 150 хвилин. На сьогоднішній день спеціально розроблено цілий ряд HRB для виконання різноманітних завдань, включаючи обробку регіональних ґрунтів, реконструкцію доріг та ресайклінг [42, 43, 61].

Зважаючи на природу, хімічний і мінералогічний склад термооброблених відходів паперового виробництва (ТАВ), їх використання для укріплення ґрунтів у дорожньому будівництві має значний потенціал. Так, у лабораторних дослідженнях Rahmat і Kinutia [62, 63] ТАВ використовували як в'язучу речовину в поєднанні з негашеним вапном і меленим гранульованим доменним шлаком для стабілізації ґрунтів.

Дослідження, проведені Mavroutidou [64, 65] та співавторами свідчать про ефективність ТАВ як інноваційних в'язучих, що використовуються як альтернатива кальцієвому вапну для стабілізації глинистих ґрунтів. Так, характеристики ґрунтів, оброблених ТАВ, були дуже подібними до ґрунтів, оброблених кальцієвим вапном. На думку авторів, використання ТАВ як альтернативи вапну має очевидні екологічні та економічні переваги через їх низьку вартість, яка включає лише затрати на

транспортування та помел.

Seguí та ін. [66, 67] досліджували фізичні, хімічні та мінералогічні характеристики ТАВ та його реакційну здатність у присутності вапна та гіпсу. Ці дослідження призвели до оптимізації HRB з високим вмістом ТАВ, характеристики якого були перевірені на будівельних розчинах і на зразках обробленого ґрунту. Результати досліджень, отриманих на глинистому ґрунті, укріпленому в'язучим, були кращими, порівняно з отриманими зі звичайними комерційними в'язучими: їх властивості були близькими в довгостроковій перспективі, але оптимізоване дорожнє гідравлічне в'язуче було більш ефективним у ранні терміни тверднення.

Загалом, досвід застосування ТАВ для стабілізації ґрунту при будівництві доріг в Україні є недостатньо вивченим. Існує ряд технологічних, економічних та екологічних переваг використання термоактивованих відходів від спалювання з макулатурного скопу для стабілізації різних типів ґрунтів як альтернативи традиційному вапну або портландцементу, проте для можливості їх практичного застосування потрібно провести додаткові дослідження.

### **1.3 Використання відходів паперового виробництва для цементних дорожніх бетонів**

Цементна промисловість є одним із основних джерел викидів вуглекислого газу – вона продукує близько 7% від усіх викидів парникових газів в земну атмосферу[68]. Водночас, виробництво бетону є одним з найбільших споживачів, природних нерудних матеріалів. Щоб усунути вплив на навколишнє середовище, пов'язаний з виробництвом цементу та постійним виснаженням природних ресурсів, існує потреба в розробці альтернативних в'язучих речовин, щоб зробити бетонну промисловість стійкою в екологічному сенсі. Використання термооброблених відходів паперообробки є перспективним напрямом економії паливо-енергетичних та зменшення витрат природних ресурсів при виробництві цементу і бетону, спрямованим на зменшення частки клінкеру в цементі, заміни частини цементу

додатковими цементуючими матеріалами. Такий підхід відповідає пріоритетним принципам рівномірного і сталого розвитку галузі, спрямованим на створення екологічно чистих малоенергоємних технологій [69].

Концепція повторного використання, переробки та відновлення природних матеріалів та ресурсів (Reuse-Recycle-Recovery, 3R) може бути успішно застосована як альтернативний метод екологічної утилізації побічних продуктів паперової промисловості в будівництві, зокрема для виробництва матеріалів на основі цементу.

У літературі недостатньо інформації про використання термооброблених відходів паперового виробництва в складі змішаних цементів. Зокрема в роботах, проведених в Японії [70] досліджувались розчини з незначним вмістом ТАВ. Встановлено, що вони характеризувались вищою міцністю на стиск після впливу кислотних дощів. Для зменшення високої водопотреби поверхнево-активованій ТАВ досліджувався як частковий замітник цементу в композитних фіброплитах [71]. Fava та ін. [72] провели детальні дослідження фізико-хімічних властивостей термоактивованих відходів та випробування на міцність двокомпонентних розчинів СЕМІ-ТАВ. Встановлено, що розчини з вмістом термоактивованих відходів паперообробки 5 мас.% мали вищу міцність на стиск, ніж розчини на основі СЕМІ. Введення до 10% ТАВ було рекомендовано для можливого використання в бетоні, однак автори не проводили жодних досліджень властивостей бетону. Також de la Gree [73] використовував ТАВ в цементних композиціях для бетону. Показано, що зменшення в ТАВ вмісту вільного вапна шляхом хімічного зв'язування не призвело до підвищення міцності на стиск, проте ТАВ у комплексі із золою винесення ТЕС є перспективною комбінацією у композиційних цементах, оскільки ТАВ активує золу. Dunster [74] стверджував, що деякі випробування були проведені у Великобританії з Lafarge Cements з використанням ТАВ у змішаних цементах з певним успіхом, але подробиці випробувань не були опубліковані. Більшість досліджень змішаних цементів з ТАВ стосувалися низькоміцного самоущільнюваного бетону та контрольованих самоущільнюваних низькоміцних цементних матеріалів (Controlled low-strength materials, CLSM) [75–78]. Mozafari та ін. [79, 80] тестували суміші ТАВ

та меленого гранульованого доменного шлаку у безклінкерному бетоні, використовуючи запатентований двоступеневий процес помолу, щоб підвищити рухливість та міцність на стиск. Кілька дослідників використовували ТАВ у комбінації з СЕМІІ та з заповнювачами із відходів виробництв. Використовувались ливарний пісок [81], склобій [82, 83] та заповнювачі рециклінгу бетону [84]. Автори [85] використовували запатентований гідрофобний порошок на основі ТАВ як водонепроникну добавку або водовідштовхувальне поверхнєве просочення для бетону, що не чинить суттєвого негативного впливу на його властивості.

Одним із основних шляхів використання ТАВ є його застосування як частини композиційної в'язучої системи на основі клінкеру. Так, Pera та Amrouz [86], досліджуючи процес випалу макулатурного скопу встановили, що при температурі термообробки 650 °С він характеризується максимальним вмістом метакаоліну, і має як гідралічні, так і пуцоланічні властивості. Автори допускають, що отримані при 800°С ТАВ можуть бути використані для заміни 20% цементу, не впливаючи на міцність, але вони є менш пуцоланічно активними, ніж ТАВ, випалені при 650°С.

За результатами досліджень, проведених іспанськими науковцями під керівництвом М. Frias [87-89], підтверджена доцільність використання термоактивованого шламу паперообробки як додаткового цементуючого матеріалу у виробництві екологічно ефективних цементів. Публікації містять детальний аналіз наукових (характеристика умов активації, пуцоланова активність, кінетика реакції системи) і технічних (реологія, фізичні та механічні властивості, стійкість до хлоридів, сульфатів, морської води і карбонізації) властивостей цього типу відходів, за використання їх як додаткового цементуючого матеріалу. Автори стверджують, що співвідношення кальциту та метакаоліну у відходах паперового шламу змінюється залежно від процесу випалу (температура, тривалість тощо), природи та вмісту неорганічної та органічної складових в його складі. У результаті кінетика реакцій кількісно змінюється залежно від частки гідратованих фаз. Змішані цементи з вмістом ТАВ виявляють високу хімічну стійкість до агресивних середовищ, таких як хлориди, сульфати, морська вода, карбонізація та різкі зміни температури.

Меко та Ighalo [90] використовували ТАВ, що не відносяться до пуцоланових матеріалів, для часткової заміни 5%, 10%, 15% та 20% портландцементу з метою вивчення його впливу на властивості бетонної суміші та бетону класу С20/25. Результати показали, що легковкладальність бетонної суміші з ТАВ зменшується зі збільшенням його вмісту. Заміна звичайного портландцементу на ТАВ до 10% призводить до зростання міцності при згині на 5,6% порівняно з бетоном контрольного складу. Водночас, міцність при стиску зменшується зі збільшенням вмісту ТАВ на понад 10%.

О'Фаррел та співавтори [91] наводять результати попереднього дослідження властивостей бетону, виготовленого з різноманітних комбінацій в'язучого, що включали портландцемент, термооброблений макулатурний скоп і мелений гранульований доменний шлак. ТАВ або суміш 50:50 ТАВ:ДГШ використовували для заміни ПЦ в кількості 0%, 20%, 40%, 60%, 66% і 80%. Результати досліджень показали, що заміна ПЦ на ТАВ або суміш ТАВ:ДГШ у співвідношенні 50:50 дозволяє отримати ефективно в'язуче для бетону. Оптимальний склад суміші з врахуванням швидкості набору міцності передбачає заміну 40% ПЦ сумішшю ТАВ – ДГШ. Оскільки ТАВ мають значний вплив на водопотребу та на час тужавіння досліджуваних сумішей, автори рекомендують використання сповільнюючої і пластифікуючої добавок для досягнення необхідної рухливості суміші.

В кількох дослідженнях [92,93,94] вивчали використання ТАВ як часткової заміни цементу в бетонних сумішах. Отримані результати показали, що використання ТАВ може покращити міцність на стиск, міцність на розтяг при згині і довговічність бетону. Однак оптимальна кількість ТАВ для використання в бетонних сумішах залежить від таких факторів, як тип цементу, хімічний та мінералогічний склад ТАВ, властивості заповнювачів.

Elbasгі та співавтори [95] досліджували характеристики самоущільнювальної бетонної суміші (розплив конуса та L-Box) та затверділого бетону (міцність на стиск, міцність на розтяг при розколюванні та модуль пружності). Отримані результати показують, що ТАВ можуть замінити до 5 мас.% звичайного портландцементу у

бетоні із покращенням його технічних та фізико-механічних властивостей. Проте зі збільшенням вмісту ТАВ властивості бетону погіршуються.

Однак недостатньо інформації щодо використання ТАВ у конструкційному високоміцному бетоні (з міцністю понад 40 МПа) і, зокрема, поєднання ТАВ з іншими додатковими цементуючими матеріалами для їх використання у дорожньому будівництві.

В останні роки прослідковується тенденція до використання в складі дорожніх бетонів мінеральних добавок різної природи активності та хімічних модифікаторів, що у комплексі дає можливість отримати бетони високої якості. Так, дослідження, проведені під керівництвом С.М. Толмачова [96, 97] вказують на ефективність застосування мікронаповнювачів для управління процесами структуроутворення цементобетонів з підвищеними експлуатаційними вимогами. Дослідженнями наукової школи М.А.Саницького [98, 99] підтверджена доцільність використання комплексних мінеральних модифікаторів для виготовлення високофункціональних еко-ефективних бетонів, зокрема, і для дорожнього будівництва. Також обов'язковим для дорожніх бетонів є застосування повітровтягувальних добавок для отримання замкнутої пористості, що компенсує внутрішні напруження від замерзання водної фази у структурі композиту [100-102].

Загалом, використання додаткових цементуючих матеріалів для заміни частини цементу в складі бетонів транспортного призначення можливе за умови збереження регламентованих фізико-механічних та експлуатаційних характеристик матеріалу, а саме міцності на розтяг при згині, водонепроникності, морозостійкості та стираності.

#### **1.4 Теоретичні передумови та наукова гіпотеза досліджень**

Узагальнення результатів досліджень в області дорожнього будівництва свідчать, що забезпечення підвищених показників якості дорожнього одягу вимагає комплексного підходу до вибору композиційних матеріалів шляхом регулювання їх

фізико-механічних і експлуатаційних властивостей з використанням відходів паперового виробництва.

На підставі глибокого аналізу літературних джерел вітчизняних і зарубіжних вчених (Солодкий С.Й., Толмачов С.М., Саницький М.А., Дворкін Л.Й., J. Kinutia, M.Sadique, M. Frias, J. Wong, M.Mavrolidou, P. Segui), присвячених розробленню в'язучих систем для цементних бетонів транспортного призначення і матеріалів для стабілізації ґрунтів основи дорожнього одягу, можна зробити висновок щодо необхідності розроблення нових композиційних матеріалів з покращеними властивостями. Для оцінки можливості використання відходів паперового виробництва для влаштування шарів дорожнього одягу доцільно дослідити процеси, що відбуваються при їх термічній обробці, вивчити фазовий склад та гідравлічну активність отриманих термоактивованих відходів (ТАВ).

Аналіз відомих закономірностей формування основних властивостей дорожньо-будівельних матеріалів дозволяє висунути гіпотезу про доцільність використання термоактивованих відходів паперового виробництва для покращення фізико-механічних і експлуатаційних характеристик дорожнього одягу, зокрема для укріплення ґрунтів та в цементобетонних покриттях.

Розробка композиційних систем з використанням регульованих термоактивованих відходів з направленим формуванням процесів їх структуроутворення для досягнення підвищених характеристик міцності, морозостійкості, тріщинності забезпечить можливість їх широкого використання в транспортному будівництві.



## РОЗДІЛ 2

### МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ХАРАКТЕРИСТИКА ВИХІДНИХ МАТЕРІАЛІВ

Особливості етапів проведення досліджень полягають у визначенні спеціальних властивостей композиційних систем в'язучих, що приведе до зміни процесів структуроутворення та механізмів хімічних взаємодій в будівельному матеріалі. Структура експериментальних досліджень наведена на блок-схемі (рисунок 2.1).

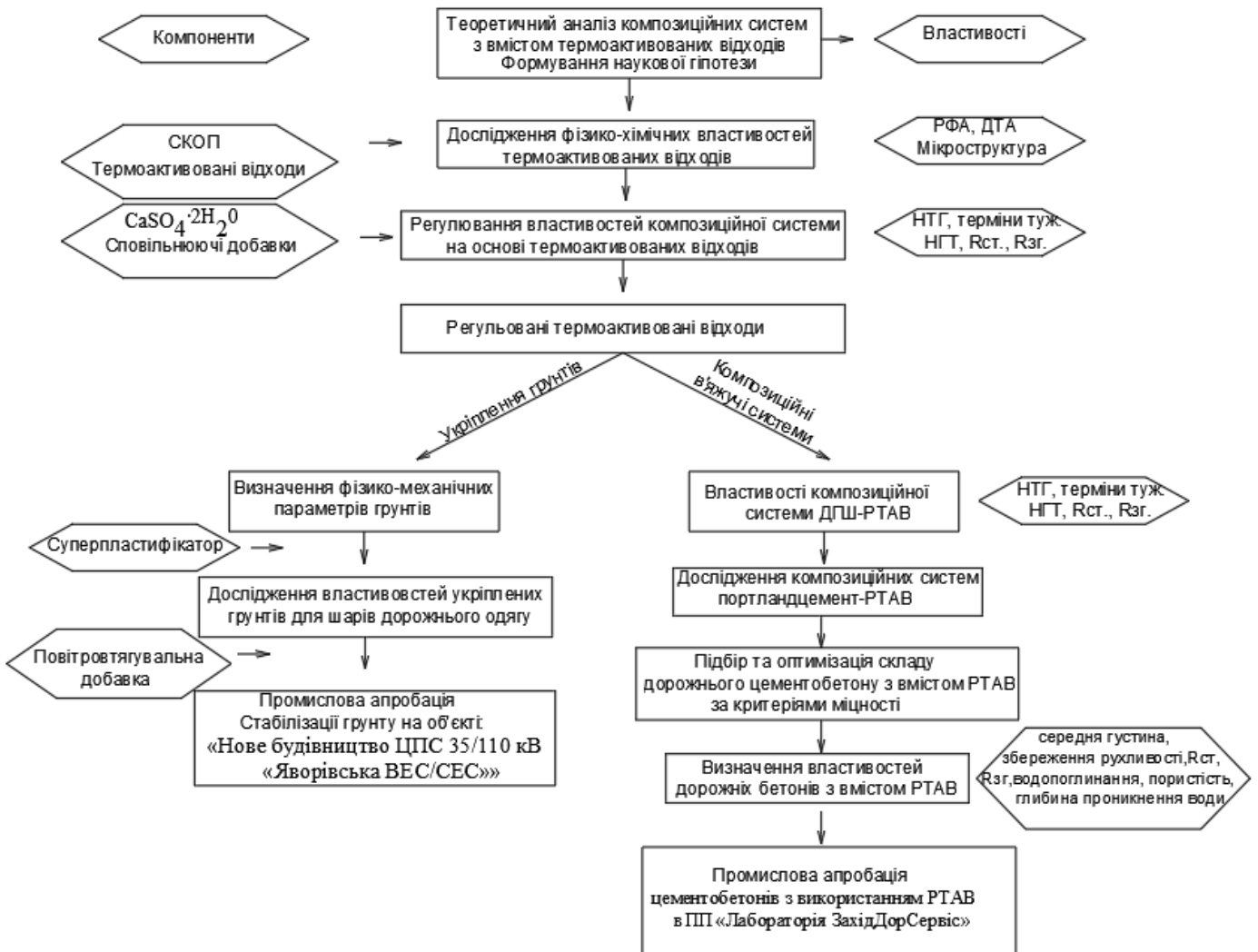


Рисунок 2.1 – Загальна блок-схема досліджень

## 2.1 Фізико-механічні випробування

Фізико-механічні випробування цементів проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-185:2009, ДСТУ Б В.2.7-187:2009 та EN 196-1-2007, що включали визначення нормальної густоти цементного тіста, термінів тужавіння, границі міцності на згин та стиск. Зразки-призми розміром 40x40x160 мм витримувались у формах протягом 24 год при температурі  $20 \pm 1$  °C та відносній вологості повітря  $\geq 90$  %. Розформовані зразки маркувались і витримувались у воді при температурі  $20,0 \pm 1,0$  °C до випробування через 2, 7 і 28 діб. Міцність зразків на розтяг при згині визначали за допомогою електромеханічного преса UTM-0108. Міцність зразків на стиск визначали на отриманих зразках-половинках призм. Щоб забезпечити площу навантаження  $25 \text{ см}^2$  згідно ДСТУ Б В.2.7-187:2009 використовували металеві накладки, а для отримання фіксованої площі навантаження  $16 \text{ см}^2$  (згідно ДСТУ EN 196-1:2007) використовували спеціальне пристосування для визначення міцності при стиску.

Випробування бетонів включали визначення густини бетонної суміші, міцності на стиск, міцності на розтяг при згині, тріщиностійкості, водопоглинання, морозостійкості та стираності.

Визначення густини бетонної суміші відбувалось після її ущільнення в жорсткому герметичному контейнері шляхом зважування згідно EN 12360- 6.

Фізико-механічні властивості бетону визначали згідно ДСТУ Б.В. 2.7-187:2009 на контрольних зразках, заформованих з бетонної суміші, яка відповідає всім вимогам стандарту.

Міцність бетону на стиск визначали на зразках-кубах розміром 100 x100 x100 мм у віці 3 і 28 діб на гідравлічному пресі П-50 (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2. Гідравлічний прес П-50 для визначення міцності на стиск

Міцність бетону на розтяг при згині визначали на зразках-призмах розміром 100x100x400 мм при чотириточковому навантаженні на електромеханічному пресі УТМ-0108 (рисунок 2.3).



Рисунок 2.3. Визначення міцності бетону на розтяг при згині на пресі УТМ-0108

Характеристики тріщиностійкості бетону досліджувались при зрівноважених механічних випробуваннях зразків-призм  $100 \times 100 \times 400$  мм. з штучно створеною тріщиною відповідно до вимог ДСТУ Б В.2.7-227:2009 (рисунок 2.4).

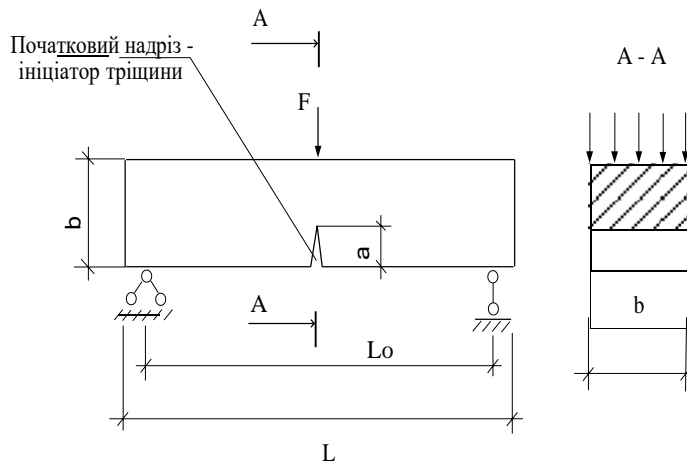


Рисунок 2.4 - Схема зрівноважених випробувань бетону на тріщиностійкість

За допомогою датчиків та програмного забезпечення «p-sens», в процесі випробувань записували повну діаграму стану бетону в координатах навантаження-прогин  $F-V$ , на підставі якої розраховувались енергетичні та силові характеристики тріщиностійкості (рисунок 2.5).

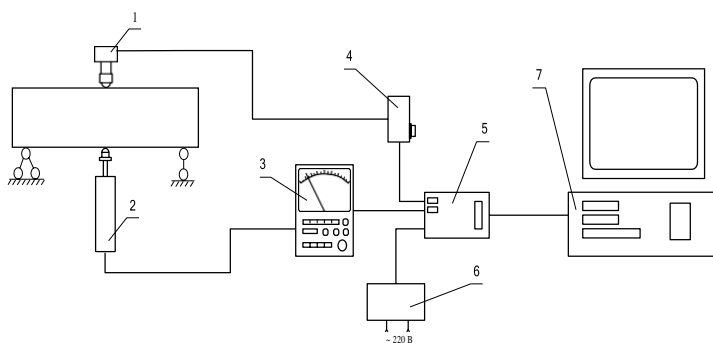


Рисунок 2.5 - Загальний вигляд (а) та схема вимірювальної частини (б) установки для визначення характеристик тріщиностійкості:

- 1 – давач зусилля (тензометр); 2 – давач переміщення індуктивного типу; 3 – підсилювач-перетворювач сигналу з давача переміщення; 4 – резисторний міст; 5 – інтерфейсна плата; 6 – блок живлення; 7 – комп'ютер

Дослідження фізико-механічних властивостей ґрунтів включали визначення щільності ґрунту при оптимальній вологості, міцності та каліфорнійського коефіцієнта несучої здатності укріплених ґрунтів.

Визначення щільності скелета ґрунту при оптимальній вологості проводили за методом Проктора згідно ASTM D 698-91 (рисунок 2.6).



Рисунок 2.6 Комплект обладнання для визначення максимальної щільності скелета ґрунту при оптимальній вологості за методом Проктора

Для оцінки опору та міцності ґрунту земляного полотна на основі тесту на проникнення визначали каліфорнійський коефіцієнт несучої здатності ґрунту CBR (рисунок 2.7.).



Рисунок 2.7 Визначення каліфорнійського коефіцієнта несучої здатності ґрунту (CBR)

Границю міцності при стиску укріплених ґрунтів визначали випробуванням зразків-циліндрів на пресі UTM-0108.

## 2.2 Фізико-хімічні методи досліджень

Для дослідження процесів гідратації та структуроутворення термоактивованих відходів паперового виробництва та розроблених композиційних систем з їх використанням проводився комплекс методів фізико-хімічного аналізу – рентгенофазовий, диференційно-термічний, електронно-мікроскопічний та рентгенофлуоресцентний аналізи.

Рентгенофазовий аналіз проводився методом порошків при CuK $\alpha$ -випромінюванні на дифрактометрах ДРОН-3 в діапазоні кутів  $2\theta=6-90^\circ$  та AERIS Research в діапазоні кутів  $2\theta=5-100^\circ$ . Рентгенівський дифрактометр AERIS Research також дає можливість відслідковувати хімічний склад фаз. Ідентифікація окремих фаз здійснювалася за положенням піків, що відповідають характерним міжплощинним віддалям за базою даних PDF-2 2010 р. випуску, формалізованою ICDD. За інтенсивністю рефлексів визначався орієнтовний вміст фаз в досліджуваній пробі.

Для диференційної термографії зразків використовувався дериватограф ОД-1500Q системи Ф. Паулік, Й.Паулік, Л. Ердеї. Аналіз дериватограм дозволяє визначити температурні максимуми, характерні для фізико-хімічних процесів, які відбуваються при нагріванні досліджуваних проб матеріалу до температури 1000 °C.

Дослідження мікроструктури та мікрозондовий рентгеноспектральний аналіз гідратованих термоактивованих зразків проводили на растровому електронному мікроскопі SEM FEI Quanta 250 FEG, оснащеному рентгенівським аналізатором, після попереднього напилення безпосередньо на поверхню свіжого сколу зразка тонкого струмопровідного шару міді. При прискорюючій напрузі до 30 кВ досягається роздільна здатність 20 нМ та електронно-оптичне збільшення до 50 000 раз.

Хімічні склади відходів паперового виробництва та портландцементів, які застосовувалися в роботі, визначали на рентгеноспектрометрі ARL 9800 XP.

## 2.3 Вихідні матеріали

Використання альтернативних видів палива для відновлювальної енергетики супроводжується утворенням техногенних відходів, які потребують утилізації. До них належать відходи виробництва паперу з вторинної сировини.

В роботі в якості вихідних матеріалів використовувались макулатурний скоп ПрАТ «Київський картонно-паперовий комбінат» та термоактивовані відходи, які утворюються при спалюванні макулатурного скопу в якості альтернативного палива (рисунок 2.8).



Рисунок 2.8 Загальний вигляд термоактивованих відходів від спалювання макулатурного скопу

Макулатурний скоп являє собою зневоднений осад механічної очистки стічних вод паперового виробництва з макулатури, який складається з целюлозного волокна та мінеральної частини. Крім целюлозного волокна, до складу органічної частини скопу в процесі переробки макулатури потрапляє також певна кількість поліетиленової плівки, пластмас, деревини, технологічних додатків. Неорганічна мінеральна частина скопу складається з тонкодисперсних добавок каоліну і крейди, які використовуються за технологією в процесі виробництва паперу. Практичне використання макулатуриного скопу згідно ТУ У 37.2 – 02126811 – 081: 2004 передбачає попереднє його висушування [6].

Зважаючи на високий вміст органічної горючої складової, оптимальним вирішенням проблеми утилізації макулатурного скопу є використання його паливного ресурсу, що супроводжується утворенням значної кількості термоактивованих відходів (ТАВ).

Хімічний склад термоактивованих відходів наведений в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Хімічний склад термоактивованих відходів

Оксиди	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	В.п.п.	Σ
Вміст мас. %	49.84	26.44	15.36	2.16	1.16	0.45	3,13	98,54

Термоактивовані відходи для проведення досліджень попередньо розмелювали в лабораторному кульовому млині до залишку на ситі №008 5-6 мас. %.

Для регулювання процесів структуроутворення використовувався природний гіпсовий камінь CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O Чернівецького родовища, який в необхідній кількості додавався при помолі термоактивованих відходів.

В якості сповільнюючих добавок використовували борну кислоту H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub>, а також карбонові кислоти – лимонну C<sub>6</sub>H<sub>8</sub>O<sub>7</sub> та винну C<sub>4</sub>H<sub>6</sub>O<sub>6</sub>, характеристика яких наведена в таблиці 2.2. Зазначені добавки також вводились при помолі термоактивованих відходів.

Таблиця 2.2

Характеристика сповільнюючих добавок

Назва	Хімічна формула	Густина, г/см <sup>3</sup>	Розчинність у воді, г/100 мл	Зовнішній вигляд
Борна кислота	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	1,435	4,72	Білий порошок
Лимонна кислота	C <sub>6</sub> H <sub>8</sub> O <sub>7</sub>	1,665	133,00	Кристалічна речовина
Винна кислота	C <sub>4</sub> H <sub>6</sub> O <sub>6</sub>	1,760	139,44	Білий порошок



В досліджуваних композиційних системах в якості в'язучих речовин використовували найбільш широкоживані портландцементи з добавкою шлаку виробництва ПрАТ «Волинь-цемент» ПЦ ІІ А/Ш-500 та ПЦ ІІ/Б-Ш-400. Хіміко-мінералогічний склад портландцементного клінкеру наведений в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

Хіміко-мінералогічний склад портландцементного клінкеру

Виробник	Вміст оксидів, мас. %							Мінералогічний склад, мас. %			
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	R <sub>2</sub> O	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF
ПАТ «Волинь-цемент»	21,44	5,22	4,84	66,18	0,95	0,72	0,65	12,39	66,12	6,80	11,97

Фізико-механічні властивості використаних цементів наведені у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4

Фізико-механічні властивості портландцементів

Вид цементу	Спит., м <sup>2</sup> /кг	А008, %	НГЦТ, %	Терміни тужавіння, год-хв		Границя міцності при стиску, МПа через ,діб		
				початок	кінець	2	7	28
ПЦ ІІ А/Ш-500	330	3,1	26,5	2-50	5-00	19,9	35,7	52,0
ПЦ ІІ/Б-Ш-400	340	3,0	26,9	2-30	4-30	14,2	31,4	46,3

В якості активної мінеральної добавки використовувався доменний гранульований шлак ПАТ "Арселорміттал Кривий Ріг", хімічний склад якого наведений в таблиці 2.5.

Хімічний склад гранульованого доменного шлаку

Оксиди	CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>
Вміст, %	43.6	37.3	10.9	6.6	0.7	0.5	0.3	0.2	0.1

В якості крупного заповнювача для дорожніх бетонів використовували гранітний щебінь кар'єру м. Коростень Житомирської області у вигляді суміші фракцій 5-10 та 10-20 мм. Випробування щебеню проводились згідно ДСТУ Б В.2.7-71-98. Його технічні характеристики наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6

Технічні характеристики щебеню

Показники		Відповідно до нормативних вимог ДСТУ Б.В.2.7-75-98	Фактичні	
			Фракція від 5 до 10 мм	Фракція від 10 до 20 мм
Повні залишки на ситах, мас. %	D	90-100	96,8	94,6
	0.5(d+D)	30-80	65,7	43,4
	D	До 10	-	-
	1.25D	До 0,5	-	-
Вміст зерен пластинчастої та голчастої форми, мас. %		До 35	12,2	13,7
Марка за міцністю		Не нижче 800 для бетону класу за міцністю В30	1200	1200
Вміст зерен слабких порід, мас. %		До 10 для бетону класу за міцністю В30	0,2	0,4
Вміст пиловидних та глинистих частинок, мас. %		До 1,0	0,7	0,8
Істинна густина, г/см <sup>3</sup>		-	2,70	2,70
Середня густина, кг/м <sup>3</sup>		2000-2800	2500	2580
Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>		-	1366	1396

Для одержання цементобетонів в роботі в якості дрібного заповнювача використовували кварцовий пісок Жовківського кар'єру Львівської області. Випробування піску проводили згідно ДСТУ Б В.2.7-232:2010 .

Технічні характеристики піску наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7

Технічні характеристики піску

Показники	Відповідно до нормативних вимог	Фактичні
Істинна густина, кг/м <sup>3</sup>	2000-2800	2650
Насипна густина, кг/м <sup>3</sup>	не менше 1100	1470
Модуль крупності	від 1,5 до 3,25	1,9
Вміст зерен розміром від 5,0 мм до 10 мм, % за масою	не більше 10	0,70
Вміст зерен розміром більше 10,0 мм, % за масою	не більше 0,5	0,1
Вміст зерен, що проходять крізь сито № 016, % за масою	не більше 15	4,0
Вміст пиловидних та глинистих частинок розміром менше 0,05 мм, % за масою	не більше 3	1-2%
Вміст органічних домішок	низький	низький

Випробуваний пісок за модулем крупності 1,9 належить до дрібних пісків та задовільняє вимоги ДСТУ Б В.2.7-32-95. Результати випробувань свідчать про відповідність піску нормативним вимогам для його застосування як дрібного заповнювача у важких та дорожніх бетонах.

В роботі використано повітровтягуювальну добавку «Microgran» яка підвищує стійкість бетону проти впливу солей, підвищує морозостійкість, полегшує ущільнення, підвищує водонепроникність бетону, покращує легкоукладальність сумішей з низьким вмістом цементу та дрібних частинок. Витрата добавки, час і інтенсивність перемішування після додавання добавки в бетон впливає на повітровтягування. Дозування добавки проводиться після

додавання води або одночасно з водою. На виробництві додавати добавку рекомендовано після пластифікатора або разом з ним. Норма її витрати становить 0,1 – 0,3% від маси цементу. Технічні характеристики добавки наведені в таблиці 2.8.

В якості пластифікуючої добавки використовувався суперпластифікатор Stachement 2570, який відрізняється високим пластифікуючим ефектом і дозволяє отримувати бетон з швидким наростанням ранньої міцності як при нормальних, так і при низьких температурах. Добавку потрібно дозувати одночасно з водою або після додавання води. Але найвищий пластифікуючий ефект досягається, коли добавка додається в уже вологий бетон, після додавання води. Норма витрати пластифікуючої добавки становить від 0,40 до 1,50% від маси цементу. Технічні характеристики добавки наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8

Технічні характеристики добавок до бетону

Назва	Stachement 2570	Microporan
Дія	суперпластифікатор	повітровтягувальна
Основа	полікарбоксилат	вінсольні смоли
Вигляд	світло-коричнева рідина	темно-коричнева рідина
Густина, г/см <sup>3</sup>	1,07±0,01	1,2 ± 0,02
Рівень рН	5,0±9,0	8,0-11,0
Концентрація розчину, %	30,0±1,5%	-
Вміст хлоридів мас.%	≤ 0,1 %	-
Дозування, мас.%	0,4-1,5	0,1-0,3

Для дослідження ефективності використання термоактивованих відходів паперової промисловості для укріплення ґрунтів дорожньої основи використовувались чотири типи ґрунтів, які найчастіше зустрічаються на території України, а саме: суглинистий пісок, супісок, глинистий суглинок та піщана глина.

## Висновки до розділу 2

1. Фізико-механічні, будівельно-технічні та експлуатаційні властивості розроблених композиційних систем з використанням термоактивованих відходів паперового виробництва та матеріалів на їх основі визначали згідно діючих стандартів та загальноприйнятих методик.

2. Процеси гідrataції та структуроутворення термоактивованих відходів паперового виробництва вивчали за результатами комплексного фізико-хімічного аналізу з використанням рентгенівської дифрактометрії, диференціальної термогравіметрії, електронної мікроскопії та мікрофазового рентгеноспектрального аналізу.

3. В роботі досліджувались відходи паперового виробництва – макулатурний скоп та термоактивовані відходи, які утворюються в результаті його використання, в якості альтернативного палива. Для регулювання процесів структуроутворення композицій використовувалися сповільнюючі добавки – двоводний гіпс, борна, лимонна та винна кислоти. В складі композиційних системи в якості в'язучих речовин використовували портландцемент ПЦ І А/Ш-500 та ПЦ ІІ Б/Ш-400, в якості мінеральної добавки доменний гранульований шлак. Для одержання дорожніх бетонів в якості крупного заповнювача використовувались гранітний щебінь фракцій 5-10 та 10-20 мм, в якості дрібного заповнювача – кварцовий пісок з  $M_{кр} = 1,9$ . В якості модифікуючих добавок застосовували повітровтягуючу добавку «Microporan» та пластифікуючу добавку «Stechment 250».

4. Для укріплення використовувались різні типи ґрунтів – суглинистий пісок, супісок, глинистий суглинок та піщана глина.

### РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СКЛАДУ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ГІДРАТАЦІЙНОГО ТВЕРДНЕННЯ ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ПАПЕРОВОГО ВИРОБНИЦТВА

#### 3.1 Вивчення фазового складу термоактивованих відходів

Формування фазового складу термоактивованих відходів, які утворюються при спалюванні макулатурного скопу, доцільно розглядати з позицій загальних принципів фазоутворення при випалі карбонатно-глинистих систем, тобто саме тих систем, до яких належить мінеральна частина макулатурного скопу, представлена крейдою і каоліном.

На дифрактограмі макулатурного скопу (рисунок 3.1) ідентифікуються лінії основних фаз, що складають його мінеральну частину: лінії кальциту  $\text{CaCO}_3$  – головного породоутворювального мінералу крейди ( $d/n= 0,303; 0,249, 0,228; 0,209; 0,1901$  нм) і каолініту  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  ( $d/n= 0,715; 0,435; 0,413; 0,385; 0,356; 0,249; 0,231; 0,228$  нм). Спостерігається також характеристична лінія домішкового кварцу  $\text{SiO}_2$  ( $d/n= 0,334$  нм).

Процеси, що протікають при термообробці макулатурного скопу, досліджувались за допомогою диференційно-термічного аналізу, який дозволяє відслідковувати якісні і кількісні зміни в матеріалах.

Аналіз дериватограм макулатурного скопу (рисунок 3.2) ускладнюється накладанням двох одночасно протікаючих процесів - горінням органічної складової і випалу мінеральної частини. Ендотермічний ефект при температурі  $100^\circ\text{C}$ , який пов'язаний з видаленням фізично зв'язаної води, одразу переходить в потужний екзотермічний ефект з максимумом при  $360^\circ\text{C}$  від згоряння органічної складової скопу. Цей ефект маскує процес ступінчастої дегідратації коліну в складі скопу. Тому лише невеликий ендотермічний ефект при температурі  $540^\circ\text{C}$  характеризує

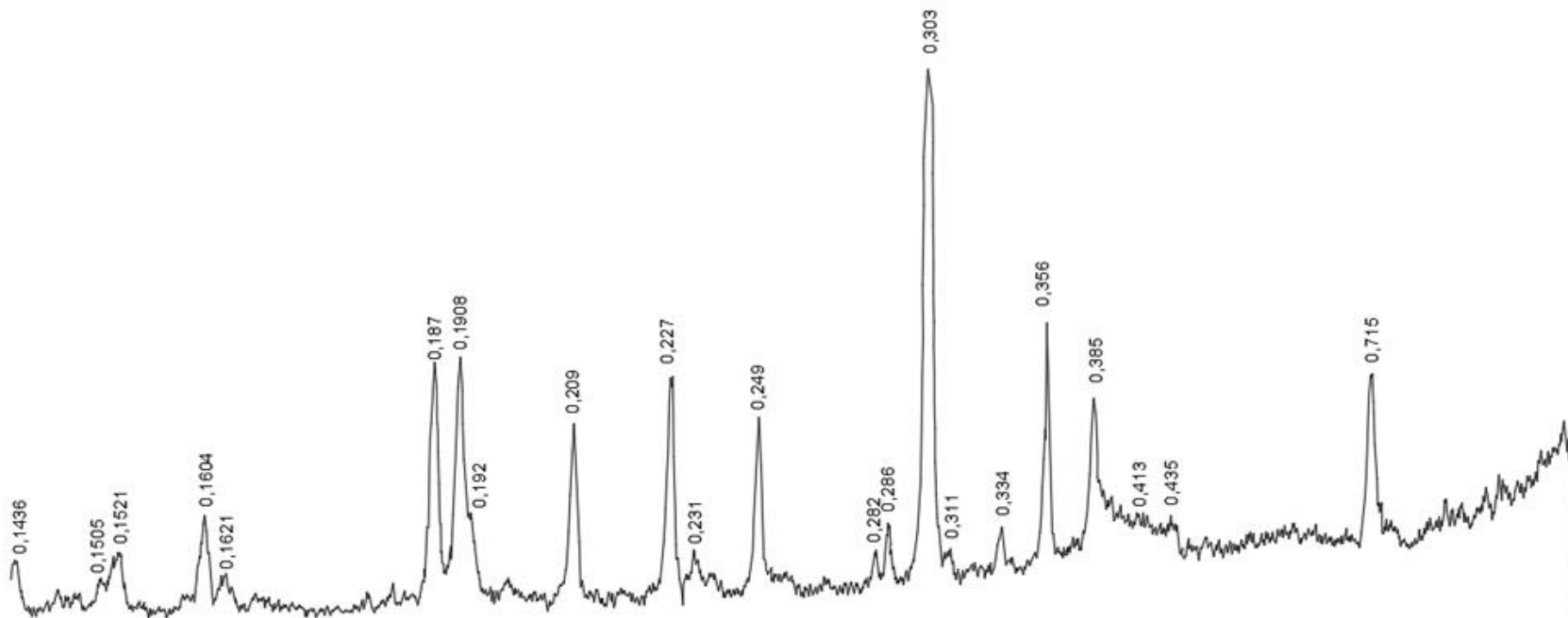


Рисунок 3.1 Дифрактограма макулатурного скопу

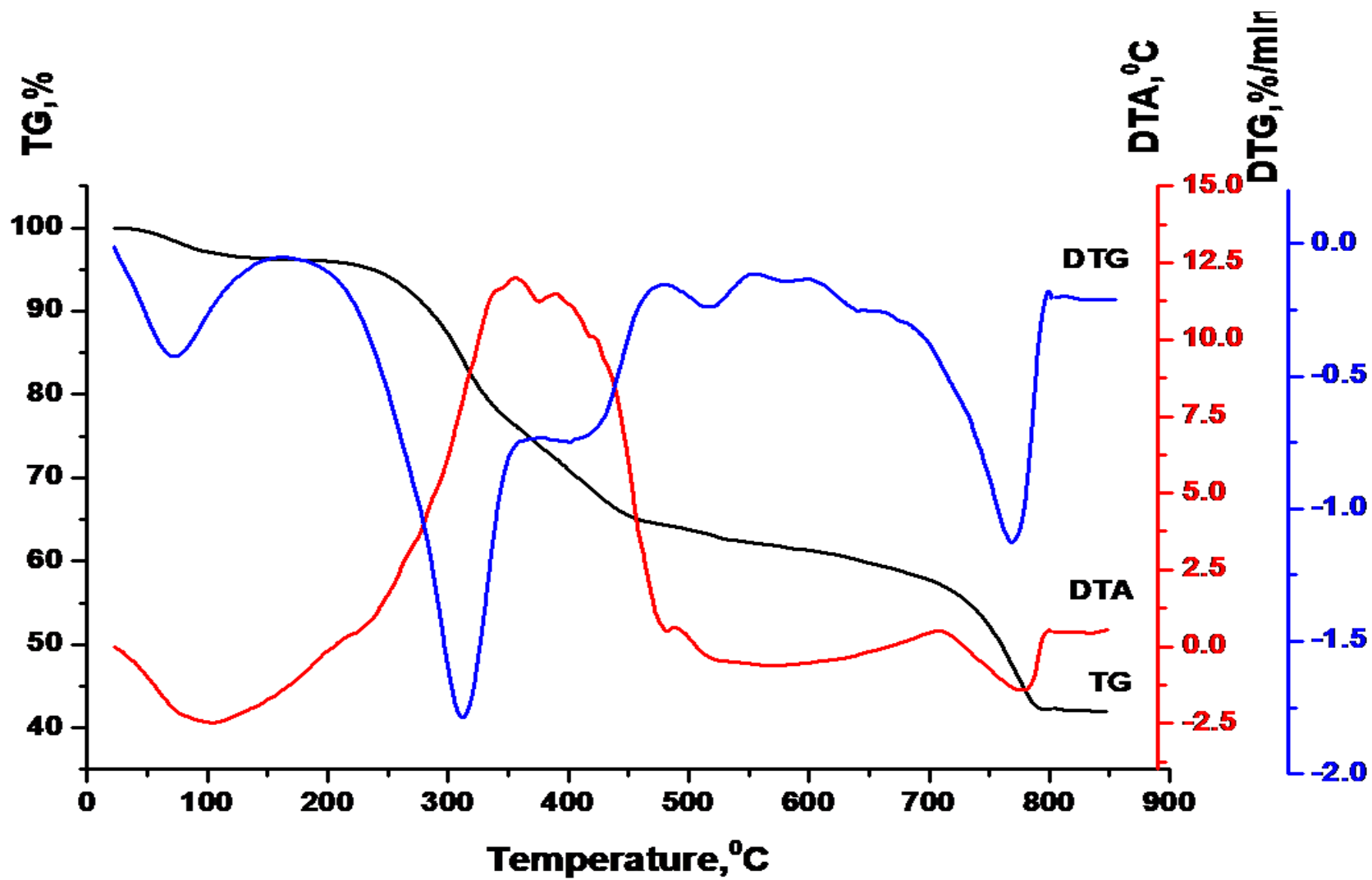
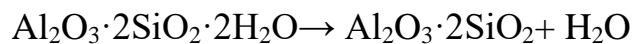


Рисунок 3.2 Дериватограма макулатурного скопу



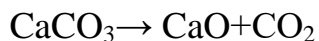
видалення хімічно зв'язаної структурної води і початок деструкції каолініту  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  - основного мінералу каолінових глин. В результаті цього утворюється метастабільний аморфізований метакаолінит [7,103].



Декарбонізація макулатурного скопу починається вже при температурі  $600^\circ\text{C}$  в результаті термохімічної дисоціації крейди при взаємодії кальциту з метакаолінитом, який має високу реакційну здатність:



Ендотермічний ефект з максимумом при температурі  $770^\circ\text{C}$  характеризує термічну дисоціацію кальциту – основного мінералу крейди:



Таким чином, показано, що при використанні макулатурного скопу в якості альтернативного палива, його органічна частина вигорає, а мінеральна утворює термоактивовані відходи.

Розвиток і кінцевий результат термообробки макулатурного скопу визначається цілим рядом чинників, починаючи від особливостей складу, структури, співвідношення компонентів мінеральної частини, наявності домішок та ін. Тобто залежно від співвідношення крейди і каоліну в складі неорганічної частини макулатурного скопу буде змінюватись мінералогічний склад випалених термоактивованих відходів та їх властивості.

Для попередньої оцінки в'язучих властивостей та ступеня гідравлічності термоактивованих відходів, які за складом належать до кальцієвих систем, в роботі використовувався модуль основності  $\text{MO}$  - гідравлічний модуль [104].

$$\text{MO} = \frac{\% \text{CaO}}{\% \text{SiO}_2 + \% \text{Al}_2\text{O}_3 + \% \text{Fe}_2\text{O}_3}$$

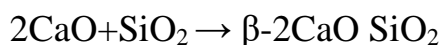
За його значенням  $\text{MO}=1,16$ , розрахованим на основі даних хімічного аналізу (таблиця 2.1), можна зробити висновок про наявність у випалених термоактивованих відходів гідравлічних властивостей, які забезпечуються присутністю в його складі

силікатів та алюмінатів кальцію, що підтверджується результатами рентенофазового аналізу.

Так, на дифрактограмі термоактивованих відходів (Рисунок 3.3) спостерігаються інтенсивні лінії  $\beta$ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  ( $d/n = 0,277; 0,275; 0,262; 0,219; 0,1990$  нм),  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $d/n = 0,492; 0,270; 0,245; 0,219$  нм) та  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $d/n = 0,423; 0,277; 0,270; 0,1901; 0,1554$  нм), які мають гідравлічні властивості. Крім того, відзначаються лінії геленіту  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  ( $d/n = 0,370; 0,286; 0,245; 0,240; 0,228; 0,1756$  нм), присутність невеликої кількості нерозкладеного кальциту  $\text{CaCO}_3$  ( $d/n = 0,303; 0,228; 0,209$  нм), вільного вапна  $\text{CaO}$  ( $d/n = 0,240; 0,1698$  нм) і продукту його гідратації  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , ( $d/n = 0,492; 0,262$  нм), а також лінії кварцу  $\text{SiO}_2$ , який був присутній у вихідному скопі ( $d/n = 0,423; 0,334; 0,245; 0,228$  нм).

Виходячи з термодинамічно зумовленої послідовності утворення мінералів, в системі  $\text{CaO-SiO}_2$  в якості первинного продукту утворюється  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , в системі  $\text{CaO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$  – моноалюмінат кальцію  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , в системі  $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  – алюмосилікат кальцію геленіт  $2\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ [104].

Двокальцієвий силікат  $\beta$ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  починає утворюватись при температурі  $600^\circ\text{C}$ , але з достатньою швидкістю цей процес відбувається при температурах  $900^\circ\text{C}$  і вище



Відомо [104,105], що  $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$ , отриманий при температурі нижче  $900\text{-}1100^\circ\text{C}$ , не здатний переходити в гідравлічно інертний  $\gamma$ - $\text{C}_2\text{S}$ , а його міцнісні характеристики значно вищі, ніж у  $\beta$ - $\text{C}_2\text{S}$ , одержаного при температурі  $1400\text{-}1450^\circ\text{C}$  в складі портландцементу.

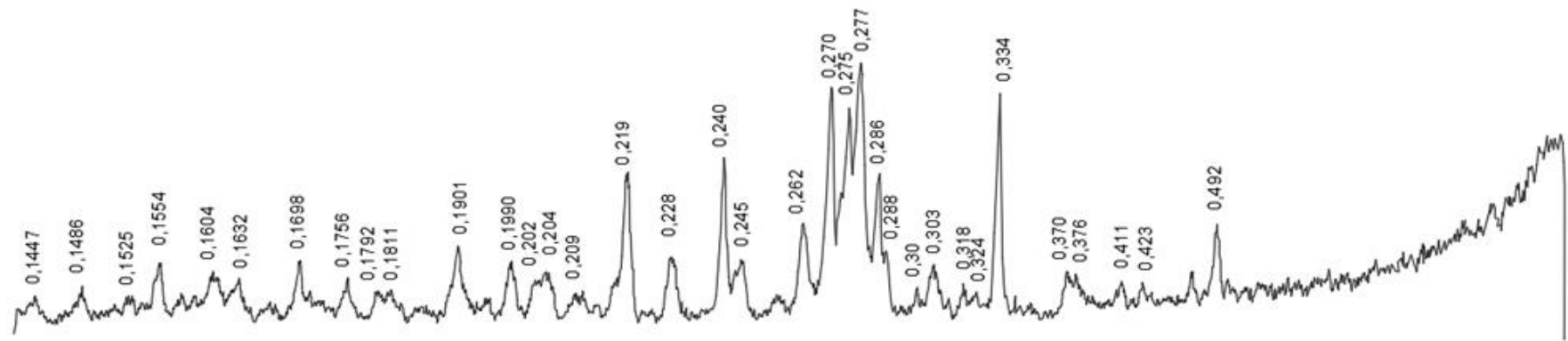


Рисунок 3.3. Дифрактограма термоактивованих відходів

Моноалюмінат кальцію  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  утворюється, починаючи з температури  $700^\circ\text{C}$ . Але у зв'язку з тим, що у мінеральній частині макулатурного скопу міститься недостатня кількість  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , відбувається донасичення  $\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  до більш основних алюмінатів  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ , а потім до  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , імовірність утворення якого, починаючи від температури  $850^\circ\text{C}$ , є підтвердженою[106].

Отже, на основі одержаних результатів встановлено, що процеси фазоутворення в мінеральній частині макулатурного скопу при його термообробці відбуваються подібно до класичних схем, характерних для карбонатно-глинистих сумішей, і включають: дегідратацію каоліну з утворенням метакаолініту  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ , декарбонізацію крейди, утворення первинних низькоосновних продуктів взаємодії між  $\text{CaO}$  і метакаолінітом  $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$ , донасичення їх вапном з утворенням більш основних  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ .

В результаті цих процесів утворюються термоактивовані відходи паперового виробництва, до складу яких входять  $\beta$ -  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  та  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$  (рисунок 3.4).

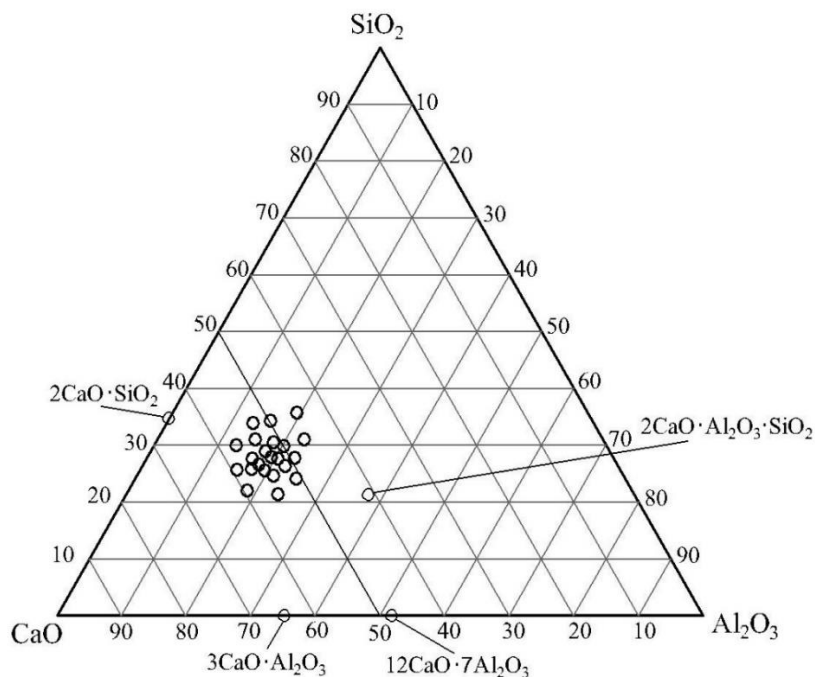


Рисунок 3.4 Система  $\text{CaO}\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  відносно складу термоактивованих відходів паперового виробництва

Залежно від вмісту карбонатного і глинистого компонентів в мінеральній частині скопу кількісне співвідношення фаз в складі термоактивованих відходів може змінюватись (рисунок 3.4).

### **3.2 Дослідження процесів структуроутворення при гідратації термоактивованих відходів**

Структуроутворення в'язучих речовин при їх гідратаційному твердненні є складним комплексом взаємообумовлених хімічних, фізико-механічних та фізичних процесів. При твердненні відбуваються реакції гідратації, гідролізу, обмінної взаємодії як в рідкій фазі, так і на поверхні частинок в'язучого.

Як було встановлено (Розділ 3.1), при формуванні фазового складу термоактивованих відходів утворюються гідравлічно активні мінерали  $\beta$ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для дослідження в'язучих властивостей термоактивованих відходів їх розмелювали у лабораторному кульовому млині до залишку 5-6 мас% на ситі №008. Процеси структуроутворення вивчались на зразках складу 1:0 при температурі  $20\pm 2^\circ\text{C}$ .

Дослідження в'язучих властивостей термоактивованих відходів було розпочато з вивчення особливостей його гідратації на початкових стадіях. Встановлено, що для термоактивованих відходів є характерною надзвичайно швидка взаємодія з водою, що супроводжується бурхливим тепловиділенням із збільшенням температури тіста до  $50\text{-}60^\circ\text{C}$ , частковим випаровуванням води замішування і надзвичайно короткими (2-3 хвилини) термінами тужавіння.

Це відбувається в результаті гідратації алюмінатів кальцію в складі термоактивованих відходів. Відомо [7,104], що реакції гідратації  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  є високоекзотермічними, протікають дуже швидко і характеризуються активним структуроутворенням вже в перші хвилини замішування з водою. Так, при

гідратації  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  при температурі до  $20^\circ\text{C}$  утворюються гексагональні гідроалюмінати кальцію змінного складу  $\text{C}_4\text{AH}_x$ , а при гідратації  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  спочатку утворюється гексагональний гідроалюмінат  $\text{C}_2\text{AH}_8$ , який внаслідок зменшення концентрації  $\text{Ca}^{2+}$  в рідкій фазі перекристалізується в  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ [7].

Умовами, що забезпечують гідратаційне тверднення  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$  і  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  є швидке відведення тепла, яке виділяється при їх гідратації, або використання добавок, сповільнюючих процеси гідратації, що дозволяє регулювати терміни тужавіння системи.

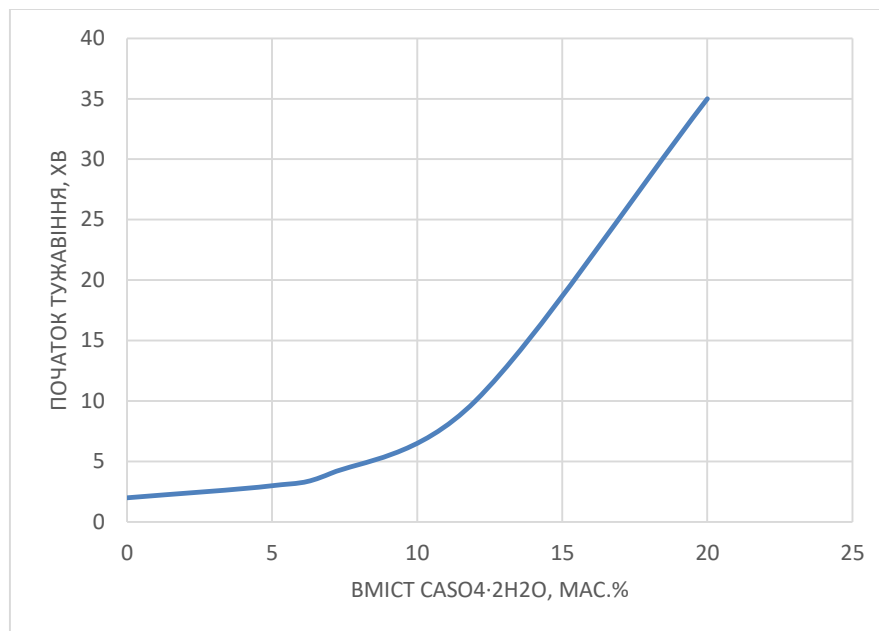
При нормальних термінах тужавіння, рівномірно розподілених в часі, відбувається поступове зв'язування води замішування в гідратні сполуки і зменшення кількості вільної води. Внаслідок цього тісто починає втрачати пластичність, густішає – настає період тужавіння. Швидке тужавіння не лише ускладнює технологію замішування і формування при виготовленні виробів, але й негативно позначається на процесах набору міцності, особливо в початковий період.

Для сповільнення процесів раннього структуроутворення використовувався класичний сповільнювач тужавіння  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  у вигляді природнього гіпсового каменю, який додавався до досліджуваного матеріалу при розмелюванні в кількості 5-20 мас. %.

Використання гіпсу для регулювання термінів тужавіння в системі  $\text{CaO}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{H}_2\text{O}$  ґрунтується на утворенні на поверхні первинних метастабільних гідроалюмінатів кальцію блокуючого пасивуючого шару тонкокристалічного еtringіту  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ , який в початковий період не знижує рухливість тіста. Але з часом він перекристалізується в призматичні голкоподібні кристали, які зростаються і викликають спочатку тужавіння, а пізніше зміцнюють структуру [105,106].

Як показали проведені дослідження (Рисунок 3.5), добавка 5-7 мас% гіпсу суттєво не впливає на терміни тужавіння і лише збільшення кількості гіпсу до 12 мас% дозволяє відтягнути початок тужавіння до 10 хв, а кінець – до 17 хв. При

введенні 20 мас% гіпсу досягається відчутне подовження термінів тужавіння – початку до 35 хв, кінця до 1 год.40 хв.



Риунок 3.5 Вплив добавки CaSO<sub>4</sub> 2H<sub>2</sub>O на початок тужавіння термоактивованих відходів

Але як було встановлено, збільшення добавки гіпсу до 20мас.% негативно впливає на міцність в'язучого (таблиця 3.1). Це пов'язано з розвитком деструктивних процесів, зумовлених утворенням в тверднучій системі надлишкової кількості еtringіту 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O [107].

Тому подальші дослідження були спрямовані на досягнення подвійного ефекту-отримання подовжених термінів тужавіння при збереженні позитивної ролі гіпсу у процесах раннього структуроутворення.

З цією метою були досліджені комплексні добвки, до складу яких, крім гіпсу, входили відомі сповільнюючі добавки [7,104], що дозволяють регулювати терміни тужавіння в'язучих систем – карбонові лимонна і винна кислоти, а також неорганічна борна кислота, які вводились при розмелюванні відходів. Вміст гіпсу в складі комплексних добавок був незмінним і становив 7,0 мас.%.

Як видно з даних, наведених в таблиці 3.1, комплексні добавки, які додатково крім гіпсу містили 1 мас.% борної і 1 мас.% лимонної кислоти, показали хороший

сповільнюючий ефект. Але їх сповільнююча дія не обмежувалась процесом тужавіння, а тривала і при подальшій гідратації в'язучого. Тому серед всіх досліджуваних складів вони мали найменшу міцність (склади 3,4). Що стосується сповільнюючої дії комплексної добавки 7,0 мас.% гіпсу і 1,0 мас.% винної кислоти, вона обмежується лише періодом тужавіння. Встановлено, що при додаванні 0,5 мас.% винної кислоти початок тужавіння сповільнюється до 15хв., кінець - до 32хв. (склад 5), а при додаванні 1,0 мас.% винної кислоти відповідно до 45хв. і 1год. 5хв. (склад 6). Ефективність добавки ґрунтується на синергічному поєднанні індивідуальних властивостей кожного з її компонентів з різним механізмом дії.

Сповільнююча дія винної кислоти полягає в її адсорбції на поверхні негідратованого в'язучого і первинних гідратних фаз та в утворенні хелатних комплексів між гідроксильними і карбоксильними групами добавки та іонами  $Al^{+3}$ . Утворювані комплекси є достатньо міцними, щоб внаслідок сповільнення розчинення зерен в'язучого та збільшення дифузійного опору, на певний час пригальмовувати реакції гідратації. Оскільки лімітуючою стадією в розвитку процесів раннього структуроутворення є дифузія через шар гексагональних гідроалюмінатів кальцію  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$ , які є первинною гідратною фазою при гідратації високоосновних алюмінатів кальцію [105], спостерігається сповільнення термінів тужавіння. З часом, коли гідратація алюмінатів кальцію активізується, вступає в дію розглянутий раніше сповільнюючий механізм гіпсу. В результаті з введенням комплексної добавки 7,0 мас.% гіпсу і 1,0 мас.% винної кислоти досягається ефективне сповільнення термінів тужавіння. При цьому відзначається позитивний вплив цієї добавки на подальший розвиток процесів структуроутворення, що підтверджується рівномірним зростанням міцності зразків (таблиця 3.1).



Таблиця 3.1

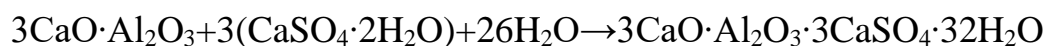
Вплив хімічних добавок на в'язучі властивості термоактивованих відходів

№ складу	Добавка		НГТ	Терміни тужавіння, год-хв		Міцність на стиск, МПа, у віці, діб				
	Назва	Кількість мас%		початок	кінець	1	3	7	14	28
1	Без добавок	-	0.77	0:02	0:03	0.1	0.2	0.5	0.6	0.7
2	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	20.0	0.44	0:35	1:40	0.2	0.3	0.8	0.8	0.6
3	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O + борна кислота	7,0 1,0	0,43	0:40	1:35	-	-	0,1	0,2	0,4
4	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O + лимонна кислота	7,0 1,0	0,41	0:30	1:25	-	-	0,2	0,3	0,6
5	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O + винна кислота	7.0 0.5	0.40	0:15	0:32	6.2	7.1	9.0	9.9	11.8
6	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O + винна кислота	7.0 1.0	0.38	0:45	1:05	7.3	8.2	9.3	10.6	13.5

Фазовий склад продуктів гідратації термоактивованих відходів паперового виробництва з регульованими термінами тужавіння (РТАВ) досліджувався за допомогою рентгенофазового аналізу. На рисунку 3.6 наведені дифрактограми гідратованих термоактивованих відходів з комплексною добавкою 7,0 мас.% CaSO<sub>4</sub>·2H<sub>2</sub>O та 1,0 мас.% винної кислоти.

Встановлено, що гідратною фазою, яка забезпечує сповільнення процесу тужавіння і ранню міцність в'язучого на основі термоактивованих відходів є еtringіт 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·3CaSO<sub>4</sub>·32H<sub>2</sub>O (d/n = 0,97; 0,56; 0,467, 0,386; 0,255 нм).

Еtringіт утворюється в перші хвилини гідратації на поверхні зерен 3CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, який відповідальний за швидке тужавіння і велике тепловиділення, при його взаємодії з добавкою гіпсу:



Кристали еtringіту мають голчасто-призматичну форму, щільною оболонкою покривають зерна  $C_3A$ , тимчасово блокуючи доступ води, чим сповільнюють його гідратацію. Переходу гексагональних гідроалюмінатів в кубічні  $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$  в даних складах не спостерігається.

До основних продуктів гідратації термоактивованих відходів з регульованими термінами тужавіння належить гексагональний гідроалюмінат кальцію  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 13H_2O$  у формі більш стабільного гідрокарбоалюмінату кальцію – гідрокальміту  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CO_2 \cdot 12H_2O$  ( $d/n=0,820; 0,386; 0,288; 0,245$  нм). Його стабільність в досліджуваній системі пов'язана з присутністю в кристалічній ґратці певної кількості іонів  $CO_3^{2-}$  [106]. Утворення карбонатмісткого гідроалюмінату AFm - складу пояснюється присутністю в тверднучій системі високореакційного  $CaCO_3$  ( $d/n = 0.303; 0.228; 0.187$  нм) (рисунок 3.6). В результаті цього не відбувається конверсії гексагонального гідроалюмінату в кубічний і пов'язаного з нею зниження міцності.

Крім того, при гідратації геленіту  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2$ , який входить до складу термоактивованих відходів, утворюється, гідрогеленіт  $2CaO \cdot Al_2O_3 \cdot SiO_2 \cdot 8H_2O$  ( $d/n = 0,366; 0,286; 0,278$  нм), який також належить до гексагональних AFm-гідроалюмінатів і є стабільною структурно-активною фазою [7].

Про високий ступінь гідратації алюмінатів кальцію в складі відходів свідчить повна відсутність на дифрактограмах (рисунок 3.6) ліній  $3CaO \cdot Al_2O_3$  і  $12CaO \cdot 7Al_2O_3$ . Лінії  $\beta$ - $2CaO \cdot SiO_2$  значно зменшили свою інтенсивність ( $d/n = 0,277; 0,275; 0,262; 0,219; 0,199$  нм). Оскільки  $\beta$ - $2CaO \cdot SiO_2$  гідратується повільно, його гідратація буде продовжуватися в подальшому, забезпечуючи міцність в'язучого в пізніші терміни.

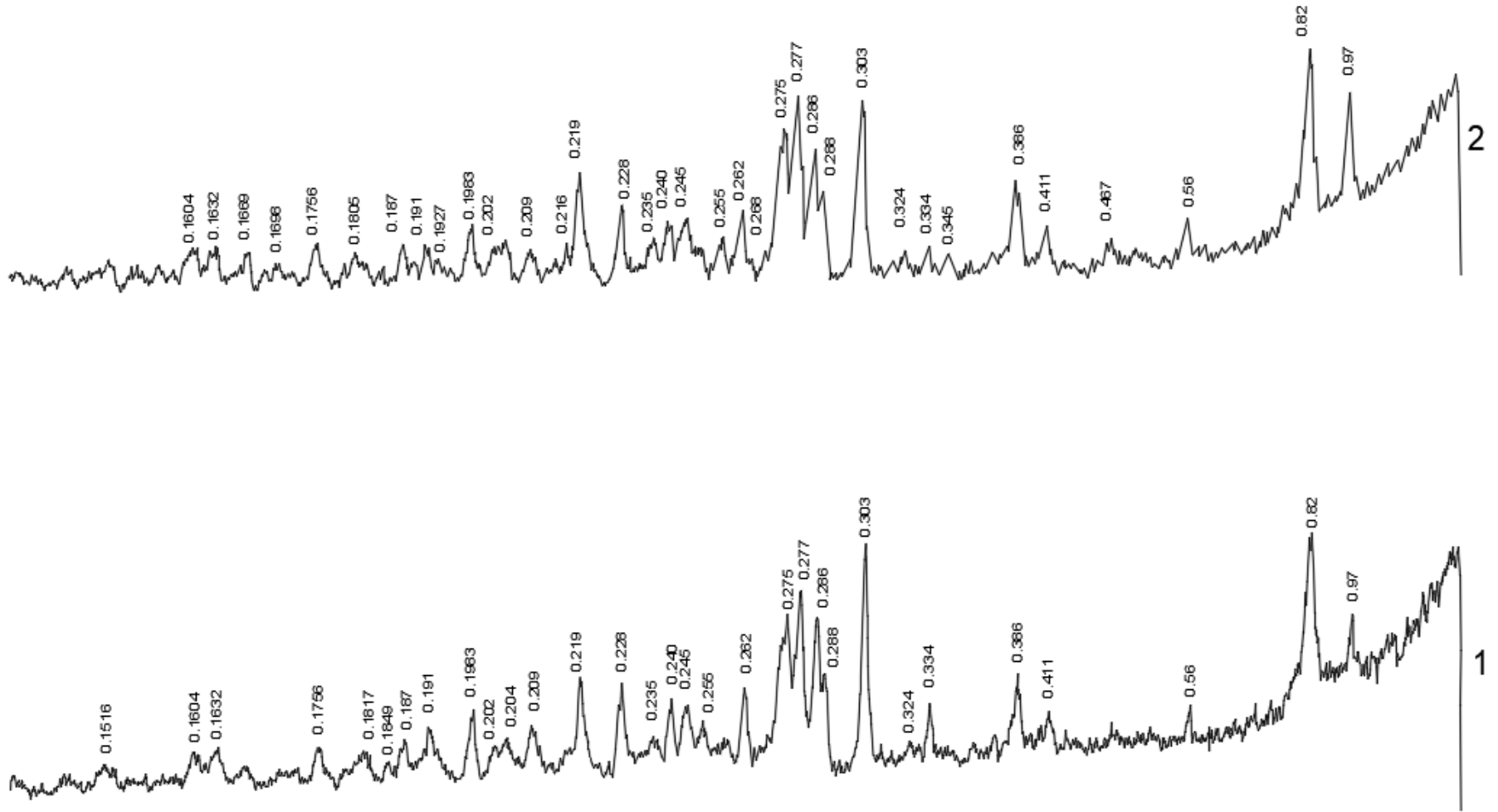
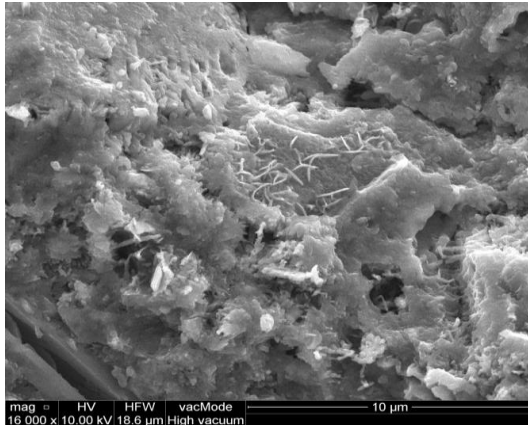
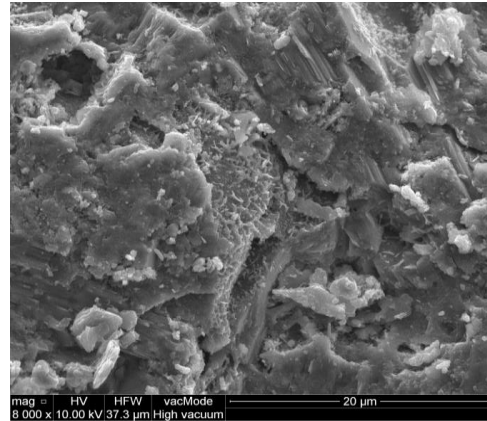


Рисунок 3.6 Дифрактограма продуктів гідратації термоактивованих відходів з комплексною добавкою 7,0 мас.%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  та 1,0 мас.% винної кислоти:  
 1 – у віці 7 діб; 2- у віці 28 діб

Мікроструктура гідратованих термоактивованих відходів з регульованими термінами тужавіння (РТАВ) характеризується великою різноманітністю форм – слабокристалічних, дрібнокристалічних і добре закристалізованих частинок різних розмірів (рисунок 3.7).



а.



б.

в.

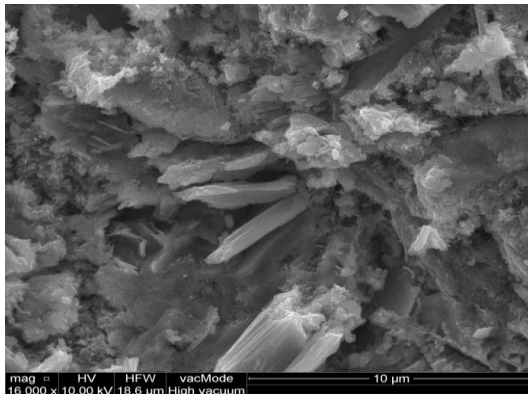


Рисунок 3.7 Мікроструктура гідратованих термоактивованих відходів з комплексною добавкою 7,0 мас.%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  та 1,0 мас.% винної кислоти, гідратованих 28 діб.

Характерними для дослідженої мікроструктури є скупчення слабозакристалізованих гідросилікатів кальцію складу  $\text{CSH}(\text{B})$ , які на окремих ділянках набувають волокнисту форму (рисунок 3.7.а). Присутність в складі термоактивованих відходів високоосновних алюмінатів кальцію в процесі гідратації призводить до утворення гідроалюмінатів кальцію  $\text{C}_4\text{AH}_{13}$ , які кристалізуються у вигляді блоків з гексагональних пластинок (рисунок 3.7.б). З введенням в систему гіпсу як регулятора термінів тужавіння змінюється хід процесів гідратації – відбувається утворення гідросульфоалюмінату кальцію - еtringіту, який має вигляд витягнутих призматичних кристалів, зібраних в

агрегати (рисунок 3.7.в).

Таким чином, термоактивовані відходи паперового виробництва мають гідравлічні властивості, утворюють тверднучі системи і потребують регулювання процесів гідратаційного тверднення.

### **Висновки до розділу 3**

1. Встановлено, що процеси фазоутворення в мінеральній частині скопу відбувається подібно до класичних схем, характерних для випалу карбонатно-глинистих сумішей. В результаті отримуються термоактивовані відходи, до складу яких за даними рентгенофазового аналізу входять  $\beta$ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ,  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ , які мають гідравлічні властивості.

2. Проведені дослідження показали, що необхідною умовою, яка забезпечує гідратаційне тверднення термоактивованих відходів, є обов'язкове регулювання процесів їх раннього структуроутворення шляхом використання комплексних добавок, сповільнюючих тужавіння, зокрема добавки оптимального складу 7,0 мас%  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  та 1,0 мас % винної кислоти, використання якої забезпечує підвищені показники міцності та технологічно обгрунтовані терміни тужавіння композиційних систем.

3. Дослідження процесів структуроутворення термоактивованих відходів з комплексною регулюючою добавкою показали, що гідратною фазою, яка забезпечує сповільнення процесу тужавіння і ранню міцність термоактивованих відходів є етрингіт  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . Встановлено, що на ранніх стадіях гідратації термоактивованих відходів переважає гідроалюмінатний тип тверднення з утворенням конверсійно стабільних гексагональних  $\text{AF}_m$ - фаз у вигляді карбонатмісткого гідроалюмінату кальцію, а також гідрогеленіту  $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ . В подальшому утворюються гідросилікати кальцію, які ущільнюють структуру, сприяючи збільшенню міцності в'язучого на основі регульованих термоактивованих відходів.

## РОЗДІЛ 4

### ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ДЛЯ УКРІПЛЕННЯ ГРУНТІВ

Укріплення ґрунтів широко застосовується для зміцнення основи і конструктивних шарів дорожнього одягу і не втрачає своєї актуальності в зв'язку з розповсюдженням зони слабких і перезволожених ґрунтів, з високою інтенсивністю автомобільного руху, що супроводжується деформацією і руйнуванням дорожнього покриття.

Подальший розвиток цієї технології йде по шляху вдосконалення існуючих і розробки нових методів укріплення із застосуванням відомих і нетрадиційних в'язучих і вторинних ресурсів, створення нових ефективних ґрунтозмішувальних машин, розробки сучасних методів експресконтролю.

Укріплення або стабілізація ґрунту – це комплекс заходів, спрямованих на надання ґрунту стійкого стану, підвищення його механічної міцності та водостійкості, збереження незмінних властивостей за допомогою стабілізуючих добавок. Укріплення включає ряд послідовних технологічних операцій, які забезпечують високу щільність, міцність та довготривалу стійкість ґрунту як в сухому, так і у водонасиченому стані. В результаті багаторічних лабораторних досліджень і різнобічних випробувань у виробничих умовах розроблені і широко застосовуються на практиці різноманітні методи укріплення ґрунтів. Одним з найпоширеніших методів є зміцнення ґрунтів мінеральними в'язучими, зокрема цементом або вапном [26, 34], що супроводжується формуванням кристалізаційної структури, яка утворюється в результаті їх гідратаційного тверднення. У процесі розробки методів укріплення ґрунтів в'язучими матеріалами вони вдосконалювалися, при цьому знаходилися нові ефективні рішення по суттєвому покращенню структурно-механічних властивостей укріплених ґрунтів. Було встановлено і підтверджено багаторічними спостереженнями у виробничих умовах, що при укріпленні ґрунтів

в'язучими матеріалами, досягаються необхідні фізико-механічні та експлуатаційні властивості основ при дорожньому будівництві.

В якості нового напрямку в укріпленні ґрунтів в'язучими матеріалами в роботі досліджувалась можливість використання з цією метою регульованих термоактивованих відходів паперової промисловості (РТАВ), які, як було встановлено (Розділ 3.2), мають гідравлічні властивості і утворюють тверднучі системи.

#### 4.1 Визначення властивостей ґрунтів

Можливість використання регульованих термоактивованих відходів в якості в'язучого для укріплення ґрунтів досліджувалась на ґрунтах різних типів, які найчастіше зустрічаються на території України, а саме: суглинистий пісок, супісок, глинистий суглинок та піщаниста глина.

На першому етапі досліджень визначались властивості вихідних неукріплених ґрунтів (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1

Властивості вихідних неукріплених ґрунтів

№	Фізико-механічні параметри	Тип ґрунту згідно ДСТУ Б В.2.1-2-96			
		Суглинистий пісок	Супісок	Глинистий суглинок	Піщаниста глина
1	2	3	4	5	6
1	Вологість $w$ , %	7.2	13.8	13.4	12.2
2	Щільність ґрунту з непорушеною структурою $\rho$ , г/см <sup>3</sup>	1.78	2.09	2.11	2.16
3	Щільність частинок ґрунту $\rho_s$ , г/см <sup>3</sup>	2.66	2.78	2.69	2.76
4	Щільність сухого ґрунту $\rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1.66	1.84	1.86	1.93
5	Пористість $n$ , %	37.6	33.8	30.9	30.1

Наступний етап досліджень полягав у визначенні гранулометричного складу ґрунтів і ґрунтоутворюючих порід – визначався відносний вміст у ґрунті елементарних ґрунтових часток різного розміру, незалежно від їх мінералогічного й хімічного складу, який виражався у масових відсотках фракцій часток різного розміру.

Відповідно до міжнародної класифікації ґрунтів, яка враховує співвідношення трьох фракцій (глина, пісок, мул), було визначено класифікаційну відповідність кожного з досліджуваних типів ґрунту. Отримані результати наведені на рисунку 4.1.

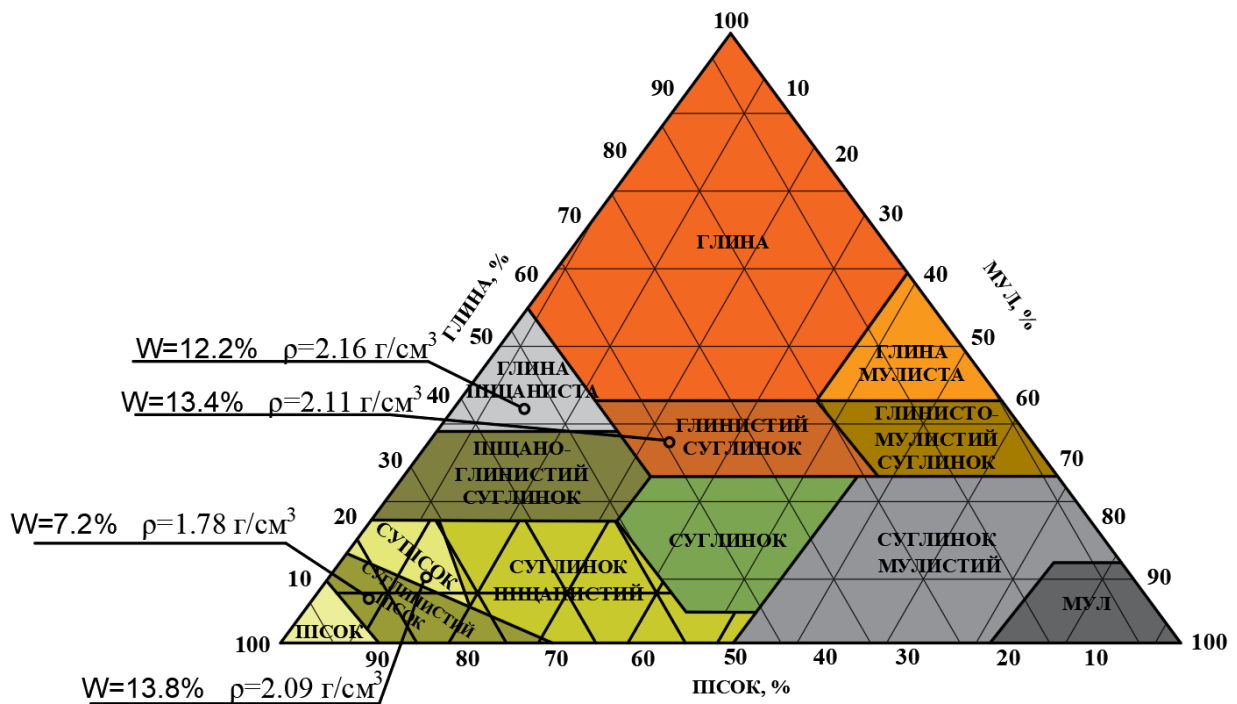


Рисунок 4.1 Класифікаційна відповідність досліджуваних ґрунтів

Відомо, що для забезпечення міцності і надійності основи дорожнього покриття, ущільнення ґрунту необхідно проводити до максимальних значень щільності скелету ґрунту при вологості, яка відповідає максимальній кількості зв'язаної води [108].

Для визначення максимальної щільності при оптимальній вологості для всіх типів досліджуваних неукріплених ґрунтів використовували геотехнічне випробування, відоме як тест на ущільнення по Проктору. Його результати використовуються як для класифікації ґрунтів, так і при виготовленні зразків ґрунту



для подальших досліджень. Процедура стандартного випробування ґрунтів по Проктору відповідала вимогам ASTM D698-91. Результати досліджень наведені в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Максимальна щільність вихідних неукріплених ґрунтів при оптимальній вологості

Тип ґрунту	Характеристика ґрунту	№ тестів			
		1	2	3	4
Суглинистий пісок	Вологість	3.3	5.6	7.2	9.8
	Щільність ґрунту у вологому стані $m/V = \rho$ , г/см <sup>3</sup>	1.721	1.733	1.781	1.761
	Щільність сухого ґрунту $\rho/(1 + c) = \rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1.586	1.642	1.661	1.604
Супісок	Вологість	8.2	11.1	13.8	16.9
	Щільність ґрунту у вологому стані $m/V = \rho$ , г/см <sup>3</sup>	1.872	2.019	2.090	2.040
	Щільність сухого ґрунту $\rho/(1 + c) = \rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1.730	1.817	1.836	1.746
Глинистий суглинок	Вологість	12.6	13.4	19.1	23.6
	Щільність ґрунту у вологому стані $m/V = \rho$ , г/см <sup>3</sup>	2.033	2.112	2.098	2.083
	Щільність сухого ґрунту $\rho/(1 + c) = \rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1.805	1.862	1.762	1.685
Глина піщаниста	Вологість	8.3	11.7	14.1	15.7
	Щільність ґрунту у вологому стані $m/V = \rho$ , г/см <sup>3</sup>	1.937	2.043	2.102	2.054
	Щільність сухого ґрунту $\rho/(1 + c) = \rho_d$ , г/см <sup>3</sup>	1.788	1.829	1.843	1.775

За результатами проведених досліджень було встановлено, що оптимальна вологість для досягнення максимальної щільності для суглинистого піску становить 7,2%, супіску – 13,8%, глинистого суглинку – 13,4% та піщанистої глини – 14,1%. (таблиця 4.2).

#### 4.2 Підбір складів ґрунтових сумішей

Аналіз сучасних тенденцій в будівництві дорожніх одягів свідчить, що укріплення шару земляного полотна є ефективним методом покращення їх властивостей. При розробці складів ґрунтових сумішей необхідно прагнути одержати суміші оптимального зернового складу з максимальною щільністю та необхідною морозостійкістю при мінімальній витраті в'язучого.

Всі випробування ґрунтових сумішей проводились згідно нормативних документів України та з врахуванням результатів експериментальних досліджень у світовій практиці.

В якості в'язучих в ґрунтових сумішах використовували регульовані термоактивовані відходи (РТАВ), а також для порівняння портландцемент ПЦ ІІ А/Ш-500 ПрАТ «Волинь-цемент». Склад ґрунтових сумішей наведений в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3

Склад ґрунтових сумішей

№	Умовне позначення складу	Ґрунт, мас.%	В'язуча речовина, мас. %	
			РТАВ	Портландцемент ПЦ ІІ А/Ш-500
1	Контр.*	100,0	–	–
2	РТАВ 8	92,0	8	–
3	РТАВ 11	89,0	11	–
4	РТАВ 14	86,0	14	–
5	ПЦ 6	94,0	–	6
6	ПЦ 10	90,0	–	10

\* неукріплений ґрунт

Використання двох видів в'язучих в складі ґрунтових сумішей дає можливість знайти оптимальний варіант у вирішенні питань досягнення якості при зменшенні витрат на їх укріплення.

Результати отримані при проведенні тестів за Проктором по визначенню максимальної щільності укріплених ґрунтів при оптимальній вологості для всіх титів досліджуваних зразків ґрунту наведені в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4

Максимальна щільність сухих укріплених ґрунтів при оптимальній вологості

Тип ґрунту	Номер складу	Умовне позначення складу	Оптимальна вологість	Максимальна щільність сухого ґрунту $\rho/(1 + c) = \rho_d$ , г/см <sup>3</sup>
Суглинистий пісок	2	РТАВ 8	7.2	1.663
	3	РТАВ 11	7.2	1.667
	4	РТАВ 14	7.1	1.701
	5	ПЦ 6	7.2	1.668
	6	ПЦ 10	7.1	1.700
Супісок	2	РТАВ 8	13.8	1.838
	3	РТАВ 11	13.7	1.840
	4	РТАВ 14	13.5	1.843
	5	ПЦ 6	13.7	1.839
	6	ПЦ 10	13.4	1.841
Глинистий суглинок	2	РТАВ 8	18.9	1.764
	3	РТАВ 11	18.8	1.765
	4	РТАВ 14	18.6	1.768
	5	ПЦ 6	18.9	1.764
	6	ПЦ 10	18.7	1.766
Глина піщаниста	2	РТАВ 8	14.0	1.776
	3	РТАВ 11	13.9	1.778
	4	РТАВ 14	13.7	1.779
	5	ПЦ 6	14.0	1.777
	6	ПЦ 10	13.8	1.778

Проведенні дослідження показали, що використання як РТАВ, так і портландцементу для укріплення ґрунтів всіх типів підвищує максимальну щільність скелета ґрунту при одночасному зменшенні оптимальної вологості. Збільшення щільності ґрунтів досягається завдяки кращій упаковці частинок у ґрунтових сумішах.

### **4.3 Визначення властивостей укріплених ґрунтів**

Укріплення ґрунтів в'язучими речовинами являє собою процес направленої структуризації, який забезпечує можливість отримання достатньо міцних та водостійких основ з заданими властивостями за рахунок реалізації оптимальних умов взаємодії в'язучих з ґрунтом.

Направлено змінити властивості місцевих ґрунтів можливо за рахунок модифікації їх різними добавками. При конструюванні та виробництві дорожніх матеріалів під модифікацією розуміють зміну фізико-хімічної структури і властивостей матеріалу шляхом введення до його складу різних добавок, в тому числі в'язучих речовин. При цьому формування структури ґрунтів, укріплених неорганічними в'язучими, проходить не відразу після завершення технологічного процесу ущільнення ґрунту в шарі дорожнього одягу, а впродовж тривалого часу. Для укріплення ґрунтів зміна властивостей у часі обумовлена процесами гідратації в'язучих в їх складі. З метою апробації розроблених ґрунтових сумішей при будівництві основ дорожніх одягів були проведенні дослідження впливу кількості та виду в'язучого на властивості укріплених ними ґрунтів.

#### **4.3.1 Визначення несучої здатності та показника набухання ґрунтів**

Для дослідження несучої здатності ґрунтів визначали каліфорнійський коефіцієнт їх несучої здатності (СВР), який являє собою тест на проникнення для оцінки опору та міцності ґрунту земляного полотна порівняно з сумішшю

оптимального складу. Оскільки це простий, швидкий і економічно ефективний тест, він широко використовується у багатьох країнах світу. Значення CBR застосовується як єдине або одне з оціночних значень для характеристики ґрунтового покриття. Щоб підготувати зразок для визначення CBR, ґрунти попередньо змішували з в'язучими – регульованими термоактивованими відходами та портландцементом в необхідному співвідношенні (таблиця 4.3). Після цього для моніторингу набухання підготовані зразки протягом 4 діб замочували у воді. Процедура випробування для визначення CBR відповідає вимогам стандарту ASTM D1883.

Результати по визначенню набухання та значення каліфорнійського коефіцієнта несучої здатності укріплених глинистих та суглинистих ґрунтів, як найбільш схильних до набухання, наведені на рисунках 4.2. – 4.3.

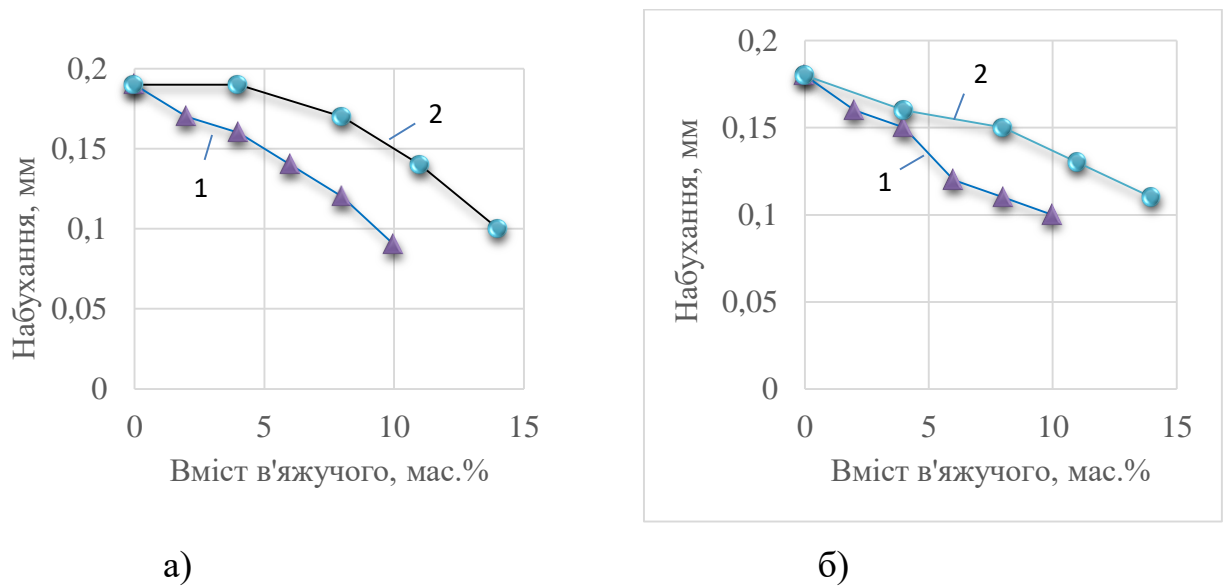


Рисунок 4.2 Показники набухання:

а) глинистих ґрунтів, б) суглинистих ґрунтів

1 – в'язуче - портландцемент; 2- в'язуче - регульовані термоактивовані відходи

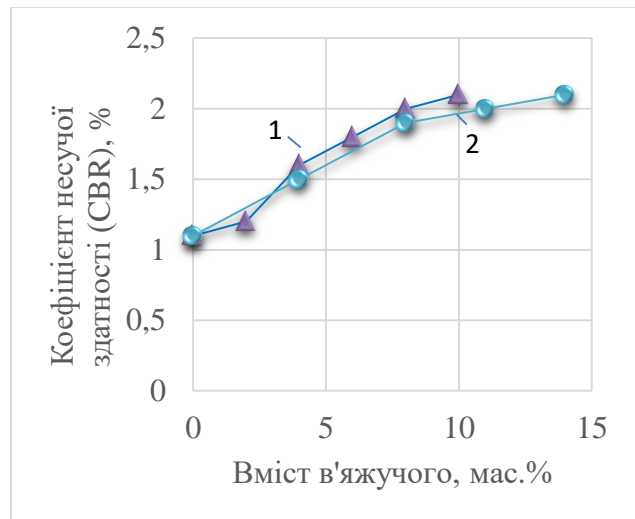
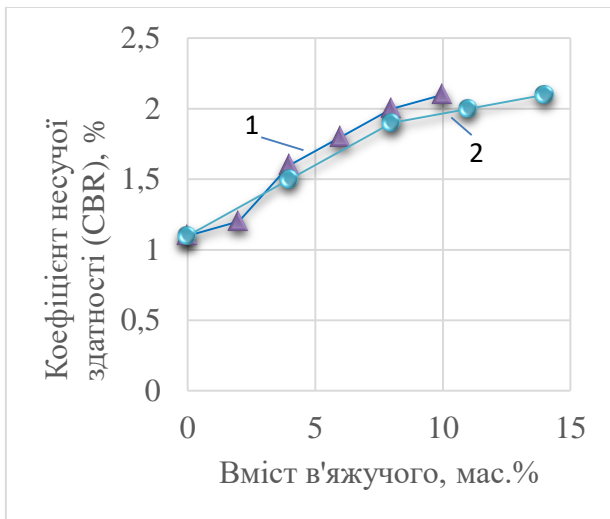


Рисунок 4.3 Каліфорнійський коефіцієнт несучої здатності ґрунтів: а) глинистих ґрунтів, б) суглинистих ґрунтів

1 – в'язуче - портландцемент; 2- в'язуче - регульовані термоактивовані відходи

Як показали проведені дослідження, набухання укріплених ґрунтів, незалежно від виду в'язучого, зменшується (рисунок 4.2). Несуча здатність укріплених ґрунтів порівняно з вихідними неукріпленими ґрунтами зростає із збільшенням вмісту в'язучих в ґрунтовій суміші. При цьому значення CBR для ґрунтів, укріплених регульованими термоактивованими відходами є вищими порівняно із ґрунтами, укріпленими портландцементом (рисунок 4.3).

#### 4.3.2 Визначення міцності та деформативності укріплених ґрунтів

Основними шляхами підвищення стійкості дороги є збільшення товщини дорожнього покриття або збільшення міцності та несучої здатності дорожньої основи і підстилаючого шару ґрунту, що дозволяє зменшити товщину покриття. Останній шлях є більш доцільним та економічно виправданим, оскільки в його основу покладено ідею максимального використання властивостей матеріалів. Важливе значення для підвищення довговічності дорожнього покриття, крім міцності, мають деформативні властивості ґрунтів основи. Так, деформація слабких ґрунтів внаслідок навантаження створює серйозні інженерні проблеми, такі як нерівномірне осідання, повзучість і колійність.

Міцність та деформативність укріплених ґрунтів визначали згідно ASTM D1633 на зразках-циліндрах. Зразки формували з врахуванням їх оптимальної вологості при максимальній щільності в сухому стані, значення якої були отримані за стандартними тестами по Проктору. Результати досліджень наведені в таблицях 4.5 – 4.8 та на рисунках 4.4 – 4.7.

Таблиця 4.5

Міцність укріплених піщаних ґрунтів

№ складу	Умовне позначення	Границя міцності на стиск, МПа, через, діб				Марка згідно ДСТУ 8801:2018
		3	7	14	28	
1	Контр.*	-	0,1	0,3	0,4	–
2	РТАВ 8	0,4	0,5	0,7	1,0	M10
3	РТАВ 11	1,0	1,1	1,2	1,5	M10
4	РТАВ 14	1,2	1,7	2,2	3,3	M20
5	ПЦ 6	0,6	0,8	1,3	1,5	M10
6	ПЦ 10	1,1	1,5	2,2	3,2	M20

\* неукріплений ґрунт

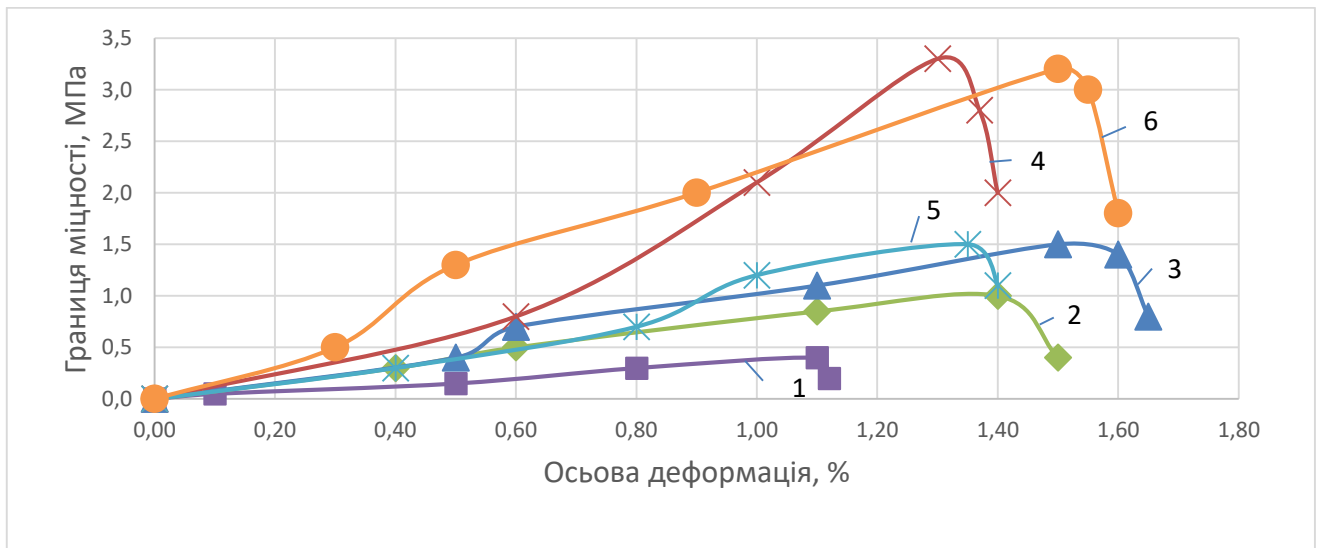


Рисунок 4.4 Вплив складу в'язучого на деформативність піщаного ґрунту

1- Контр.; 2- РТАВ 8 ; 3 – РТАВ 11; 4 – РТАВ 14; 5 – ПЦ 6; 6 – ПЦ 10

## Міцність укріплених супіщаних ґрунтів

№ складу	Умовне позначення	Границя міцності на стиск, МПа, через, діб				Марка згідно ДСТУ 8801:2018
		3	7	14	28	
1	Контр.	-	0,1	0,3	0,4	–
2	РТАВ 8	0,5	0,8	1,3	2,0	M20
3	РТАВ 11	0,7	1,2	1,9	2,5	M20
4	РТАВ 14	1,3	1,8	2,5	3,7	M20
5	ПЦ 6	0,8	1,4	1,8	2,6	M20
6	ПЦ 10	1,1	1,7	2,3	3,5	M20

\* неукріплений ґрунт

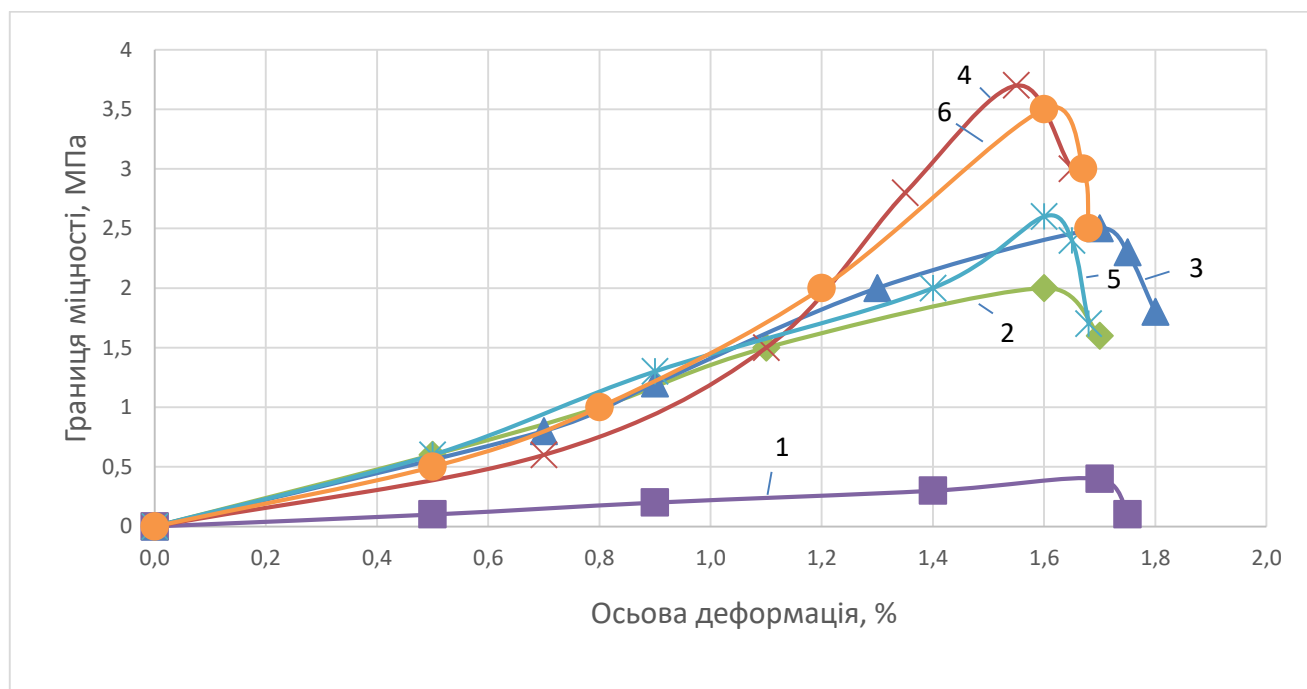


Рисунок 4.5 Вплив складу в'язучого на деформативність супіщаного ґрунту

1- Контр.; 2- РТАВ 8 ; 3 – РТАВ 11; 4 – РТАВ 14; 5 – ПЦ 6; 6 – ПЦ 10



## Міцність укріплених суглинистих ґрунтів

№ складу	Умовне позначення	Міцність на стиск, МПа через діб				Марка згідно ДСТУ 8801:2018
		3	7	14	28	
1	Контр.	0,2	0,4	0,7	0,8	-
2	РТАВ 8	1,5	2,4	3,8	4,9	М40
3	РТАВ 11	2,2	3,4	4,5	5,9	М40
4	РТАВ 14	3,1	4,3	5,0	7,0	М40
5	ПЦ 6	1,7	2,5	3,7	5,0	М40
6	ПЦ 10	2,8	4,1	5,0	6,9	М40

\* неукріплений ґрунт

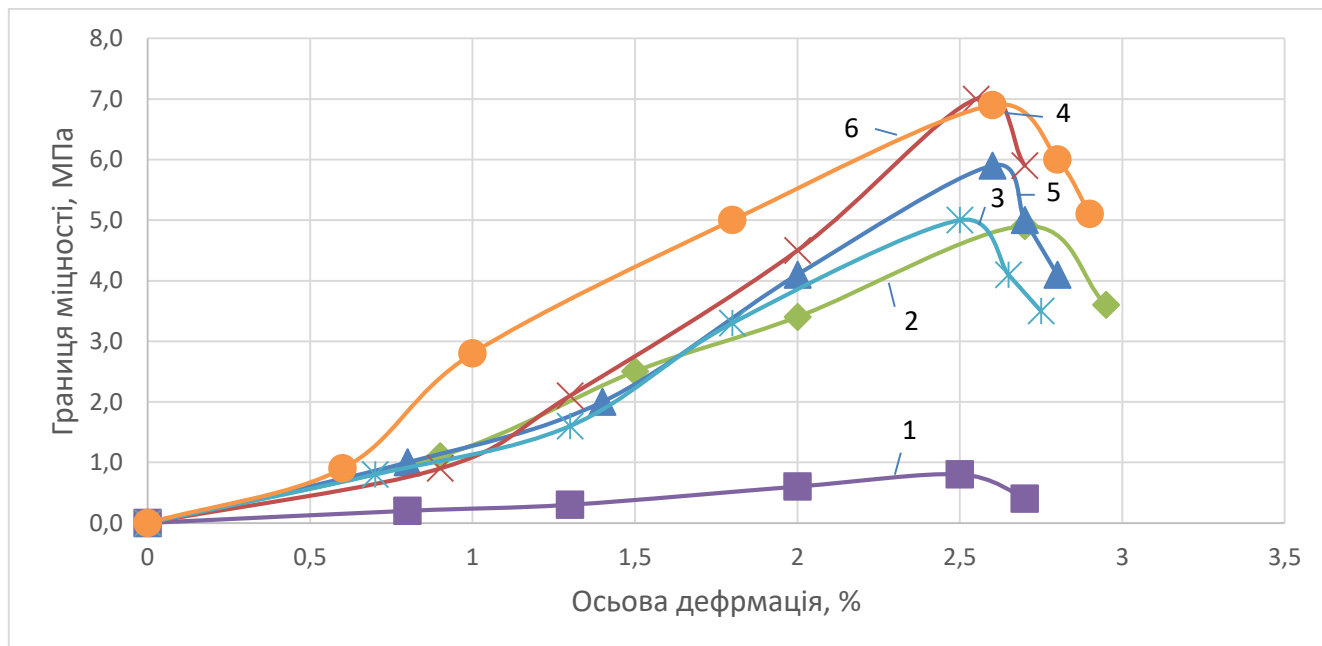


Рисунок 4.6 Вплив складу в'язучого на деформативність суглинистого ґрунту

1- Контр.; 2- РТАВ 8; 3 – РТАВ 11; 4 – РТАВ 14; 5 – ПЦ 6; 6 – ПЦ 10

## Міцність укріплених глинистих ґрунтів

№ складу	Умовне позначення	Міцність на стиск, МПа через діб				Марка згідно ДСТУ 8801:2018
		3	7	14	28	
1	Контр.	0,2	0,4	0,7	0,8	-
2	РТАВ 8	2,9	4,3	5,2	7,0	M40
3	РТАВ 11	3,5	5,2	6,7	8,5	M40
4	РТАВ 14	4,7	7,3	8,5	11,3	M40
5	ПЦ 6	2,8	4,1	5,0	6,8	M40
6	ПЦ 10	4,4	6,8	8,3	11,2	M40

\* неукріплений ґрунт

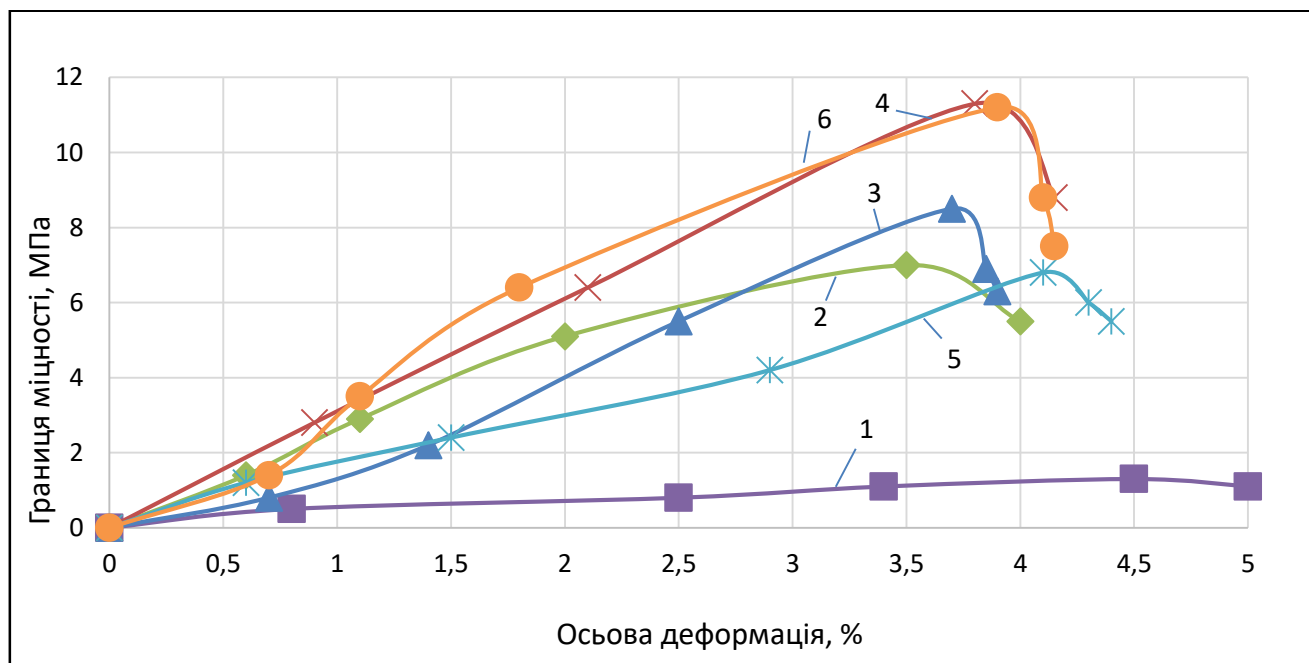


Рисунок 4.7 Вплив складу в'язучого на деформативність глинистого ґрунту:

1- Контр. ; 2- РТАВ8 ; 3 – РТАВ11; 4 – РТАВ14; 5 – ПЦ6; 6 – ПЦ -10

Проведені дослідження показали, що всі типи ґрунтів, не укріплені в'язучими матеріалами (склади №1) мають низьку міцність (таблиця 4.5 - 4.8) і не можуть використовуватися при будівництві конструктивних шарів дорожнього одягу. При

цьому деформативність суглинистих і глинистих ґрунтів при навантаженні є найбільшою (рисунок 4.7 - 4.8). Як видно з отриманих даних (таблиця 4.5 - 4.8), укріплені піщані та супіщані ґрунти, за міцністю поступаються суглинистим та глинистим ґрунтам.

Встановлено, що залежно від виду та кількості в'язучих речовин, які використовувалися для укріплення ґрунтів, змінюється кінетика наростання міцності та її значення. Так, при використанні мінімальної кількості в'язучих, як РТАВ, так і портландцементу (склади № 2, 3, 5), для піщаних ґрунтів досягається марка за міцністю лише М10. Збільшення кількості РТАВ до 14 мас % (склад №4), та портландцементу 10 мас % (склад №6), дозволяє отримати марку М20 (таблиця 4.5). В той же час всі склади піщаних ґрунтів, укріплені як РТАВ, так і портландцементом мають марку М20 (таблиця 4.6), при цьому вони відрізняються значно вищим рівнем показників міцності в цілому, а міцність ґрунту, укріпленого 14 мас % РТАВ (склад №4) є найвищою.

Згідно з результатами досліджень найбільшу міцність мали укріплені суглинисті та глинисті ґрунти всіх складів - їх марка за міцністю становила М40 (таблиця 4.7- 4.8). Найвищі показники міцності суглинистих та глинистих ґрунтів у терміни випробувань мали ґрунти, укріплені 14 мас% РТАВ (склад №4). Міцність ґрунтів, укріплених 10 мас% портландцементу (склад №6) мала близькі, але дещо менші значення.

Аналізуючи деформативність укріплених піщаних та супіщаних ґрунтів, слід відзначити характерне для них швидке руйнування при навантаженні (рисунок 4.5 - 4.6), що пов'язано з особливостями їх гранулометричного та мінералогічного складів. У випадку укріплених суглинистих та глинистих ґрунтів при навантаженні напруження передаються всередині зразків у всіх напрямках, не викликаючи значних деформацій (рисунок 4.7 - 4.8). Найменша деформативність характерна для ґрунтів укріплених 14 мас%. РТАВ (склади №4).

Таким чином, як показали наведені дослідження регульовані термоактивовані

відходи (РТАВ) можуть використовуватися для укріплення ґрунту, не поступаючись досягнутим значенням міцності ґрунтам, укріпленими портландцементом. При цьому в залежності від типу ґрунту та кількості РТАВ в його складі можна отримати марки укріплених ґрунтів М10, М20, М40.

### **4.3.3 Визначення морозостійкості укріплених ґрунтів**

Для території України є характерним сезонне зниження температури до від'ємних значень, що робить необхідним проведення випробувань укріплених ґрунтів під дією повторних циклів заморожування-відтавання.

Випробування на морозостійкість проводили згідно з ASTM D560. Одержані результати наведені в таблиці 4.9.

Як видно з даних таблиці 4.9 неукріплені зразки ґрунтів (склади №1) не пройшли випробування на морозостійкість, в той час як всі типи досліджуваних ґрунтів, укріплені як портландцементом так і РТАВ витримали 15 та 25 циклів заморожування-відтавання.

Встановлено, що всі ґрунти, укріплені 10 мас.% портландцементу (склади №6) та ґрунти, укріплені 14 мас.% регульованими термоактивованими відходами (склади №4), мають однакові, або дуже близькі значення коефіцієнтів морозостійкості. Це підтверджує можливість використання для укріплення ґрунтів в якості в'язучого замість портландцементу регульованих термоактивованих відходів (РТАВ).

Таблиця 4.9

## Морозостійкість укріплених ґрунтів

Тип ґрунту	Умовне позначення складу	№ складу	Морозостійкість зразків, після циклів заморожування-відтавання		Марка ґрунту згідно ДСТУ 8801:2018	Нормативні межі коефіцієнта морозостійкості згідно ДСТУ 8801:2018
			15	25		
1	2	3	4	5	6	7
Суглинистий пісок	Контр.*	1	0,00	0,00	-	
	РТАВ 8	2	0,69	0,65	M10	не менше 0,65
	РТАВ 11	3	0,78	0,69	M10	не менше 0,65
	РТАВ 14	4	0,80	0,73	M20	не менше 0,70
	ПЦ 6	5	0,77	0,68	M10	не менше 0,65
	ПЦ 10	6	0,79	0,73	M20	не менше 0,70
Супісок	Контр.*	1	0,00	0,00	-	
	РТАВ 8	2	0,72	0,68	M10	не менше 0,65
	РТАВ 11	3	0,78	0,72	M20	не менше 0,70
	РТАВ 14	4	0,80	0,74	M20	не менше 0,70
	ПЦ 6	5	0,78	0,72	M20	не менше 0,70
	ПЦ 10	6	0,80	0,74	M20	не менше 0,70

\*Неукріплений ґрунт

Продовження таблиці 4.9

1	2	3	4	5	6	7
Глинистий суглинок	Контр.*	1	0,00	0,00	-	
	РТАВ 8	2	0,80	0,70	M20	не менше 0,70
	РТАВ 11	3	0,83	0,77	M40	не менше 0,75
	РТАВ 14	4	0,86	0,81	M40	не менше 0,75
	ПЦ 6	5	0,81	0,75	M40	не менше 0,75
	ПЦ 10	6	0,85	0,80	M40	не менше 0,75
Глина піщаниста	Контр.*	1	0,00	0,00	-	
	РТАВ 8	2	0,80	0,71	M20	не менше 0,70
	РТАВ 11	3	0,85	0,78	M40	не менше 0,75
	РТАВ 14	4	0,86	0,82	M40	не менше 0,75
	ПЦ 6	5	0,84	0,77	M40	не менше 0,75
	ПЦ 10	6	0,86	0,80	M40	не менше 0,75

\*Неукріплений ґрунт

Структурування при укріпленні ґрунтів регульованими термоактивованими відходами відбувається в результаті розвитку процесів їх гідратації в системі «ґрунт- регульовані термоактивовані відходи – вода». При цьому в об'ємі укріплюваного ґрунту гідратні фази (гідросульфоалюмінати, гідроалюмінати, гідросилікати) в результаті адгезійної взаємодії з частинками ґрунту забезпечують необхідні властивості укріплюваним ґрунтам.

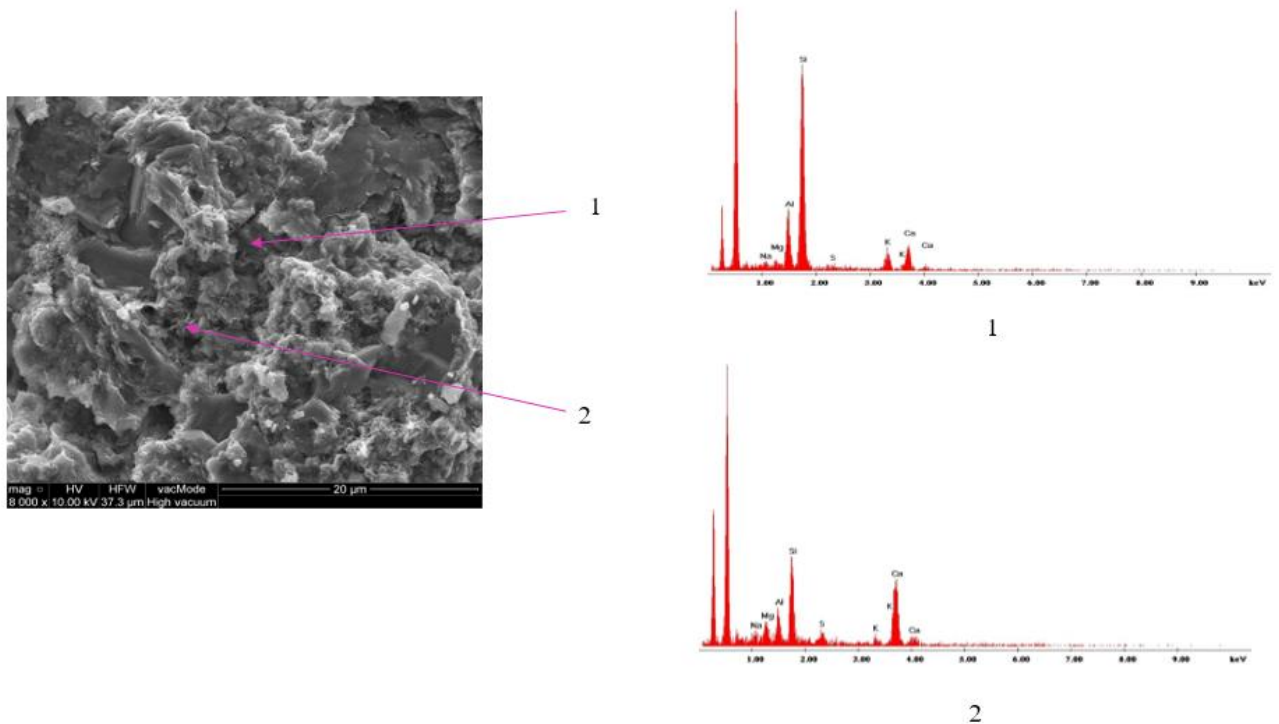


Рисунок 4.8 Мікроструктура та спектр рентгенівського випромінювання глинистого ґрунту, укріпленого 14 мас.% регульованих термоактивованих відходів

Результати досліджень по вивченню фізико-механічних властивостей укріплених регульованими термоактивованими відходами ґрунтів добре корелюють з результатами досліджень їх мікроструктури. Як видно з рисунку 4.8, мікроструктура укріпленого ґрунту характеризується присутністю частково впорядкованих пластинчастих та волокнистих кристалів продуктів гідратації регульованих термоактивованих відходів, які обволікають частинки ґрунту, забезпечуючи тісніший контакт між ними, що призводить до зменшення набухання, збільшення показників міцності та морозостійкості.

## Висновки до розділу 4

1. Критерієм підбору оптимальних складів ґрунтових сумішей було досягнення максимальної щільності їх зернового складу при оптимальній вологості. Встановлено, що максимальна вологість ґрунтових сумішей згідно тесту Проктора становить для суглинистого піску - 7,2%, супіску - 13,8%, глинистого суглинку - 13,4%, піщаної глини - 14,1%.

2. При визначенні каліфорнійського коефіцієнта несучої здатності ґрунтів (CBR) у порівнянні з еталонною величиною при нормативних навантаженнях встановлено, що при використанні в якості в'язучого регульованих термоактивованих відходів для укріплення досліджуваних ґрунтів, спостерігається збільшення їх несучої здатності та зниження набухання.

3. Встановлено, що регульовані термоактивовані відходи можуть використовуватись для укріплення ґрунтів різних типів, не поступаючись властивостям ґрунтам, укріпленим портландцементом. Так, залежно від типу ґрунту, при заміні 10 мас% портландцементу на 14 мас.% регульованих термоактивованих відходів досягається необхідний рівень показників міцності та морозостійкості з отриманням марок укріпленого ґрунту М10, М20, М40.

4. Показано що використання для укріплення ґрунтів в якості в'язучого регульованих термоактивованих відходів в кількості 14 мас.% забезпечує розвиток процесів направленої структуроутворення в системі «ґрунт- регульовані термоактивовані відходи – вода», що забезпечує зміцнення шару замляного полотна з досягненням необхідних показників міцності та морозостійкості, зменшення набухання.



## РОЗДІЛ 5

# ВИКОРИСТАННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ТЕРМОАКТИВОВАНИХ ВІДХОДІВ ЯК ДОДАТКОВИХ ЦЕМЕНТУЮЧИХ МАТЕРІАЛІВ В ДОРОЖНІХ ЦЕМЕНТОБЕТОНАХ

### 5.1 Дослідження процесів структуроутворення в системі «доменний гранульований шлак - регульовані термоактивовані відходи»

В зв'язку з тим, що в складі дорожніх цементобетонів широко застосовуються портландцементи з добавкою доменного гранульованого шлаку, в роботі був досліджений вплив регульованих термоактивованих відходів на хід процесів гідратації доменного гранульованого шлаку.

Відомо [7], що гідравлічна активність гранульованих шлаків зумовлена їх скловидною структурою, для якої характерна метастабільність. Тому гідравлічна активність доменного гранульованого шлаку проявляється лише за умови його активізації за лужним, сульфатним або змішаним механізмом [105]. При взаємодії з активізаторами тверднення порушується термодинамічно нестійкий стан шлакового скла, що служить поштовхом для розвитку процесів гідратації.

Так, при гідратації портландцементу з добавкою шлаку активізація шлакового скла відбувається за змішаним механізмом – її лужний компонент забезпечується  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , а сульфатний –  $\text{CaSO}_4$ , які присутні в тверднучій системі.

Як було встановлено (розділ 3.1), до складу регульованих термоактивованих відходів (РТАВ) входять гідравлічно активні фази – високоосновні алюмінати кальцію  $\text{C}_3\text{A}$  і  $\text{C}_{12}\text{A}_7$ , силікат кальцію  $\beta\text{-C}_2\text{S}$ , невелика кількість вільного вапна  $\text{CaO}$ , а також регулююча комплексна добавка, що містить 7,0 мас.%  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  і 1,0 мас.% винної кислоти.

Зважаючи на хіміко-мінералогічний склад та гідравлічну активність РТАВ, була досліджена ефективність їх використання для активізації тверднення доменного гранульованого шлаку. Для вивчення впливу співвідношення складників композиційної системи ДГШ-РТАВ на її фізико-механічні властивості

були заформовані зразки 2x2x8 см складу 1:0, які тверднули у воді при нормальних умовах.

Як показали одержані результати (таблиця 5.1), із збільшенням вмісту регульованих термоактивованих відходів в системі зростає водопотреба в'язучого. Також прослідковується чітка залежність між вмістом РТАВ та швидкістю тужавіння в'язучої системи: із зростанням вмісту термоактивованих відходів відбувається скорочення термінів тужавіння. Так, при співвідношенні ДГШ:РТАВ=70:30 початок тужавіння становить 45 хв, а кінець – 1 год 40 хв., тоді як для співвідношення ДГШ:РТАВ=30:70 терміни тужавіння становлять 22 і 45 хв відповідно.

Оскільки РТАВ містять деяку кількість вільного СаО, була визначена також схильність композиції до розширення при тужавінні шляхом пропарювання зразків у бані Ле-Шательє. Одержані результати свідчать, що лише при співвідношенні ДГШ:РТАВ>40:60 розширення становить більше 10 мм, допустимих EN 196 9 (таблиця 5.1).

Встановлено, що найвищу ранню міцність – 2,23 МПа на згин та 7,6 МПа на стиск досягають зразки із максимальним вмістом РТАВ – 70 мас.%. Це пояснюється швидкою гідратацією алюмінатних фаз в складі РТАВ, що забезпечує міцність при ранньому структуроутворенні. Проте найвищими показниками міцності як на стиск (38,3МПа), так і, особливо, на згин (4,6 МПа) у пізні терміни гідратації, коли переважає гідросилікатний тип тверднення, характеризуються зразки з співвідношенням ДГШ:РТАВ=70:30 (таблиця 5.1).

Таблиця 5.1

## Вплив складу на фізико-механічні властивості в'язучої системи

№	Компонентний склад в'язучої системи, мас.%		Терміни тужавіння, год:хв		Розширення > 10мм	НГТ	Границя міцності на розтяг при згині, МПа, у віці, діб			Границя міцність на стиск, МПа, у віці, діб			
	ДГШ	РТАВ	початок	кінець			7	28	360	7	28	90	360
1	70	30	0:45	1:40	Ні	0,28	0,60	2,20	4,6	4,8	11,4	23,1	38,3
2	60	40	0:35	1:15	Ні	0.30	0.68	2.71	3,9	5.4	12.2	21,8	31,2
3	50	50	0:30	1:00	Ні	0.32	1.72	2.92	3,6	6.2	12.6	17,6	29,8
4	40	60	0:26	0:55	Ні	0.36	1.72	2.79	3,3	6.7	11.1	14,3	21,4
5	30	70	0:22	0:45	Так	0.39	2.23	2,75	3,1	7.6	8.5	11,1	17,3

Одержані результати та їх інтерпретація свідчать про ефективність використання РТАВ для активізації ДГШ, яка відбувається за сульфатним та частково лужним механізмом. Як показали рентгенофазові дослідження (рисунок 5.1), основними гідратними фазами в композиційній системі 70 мас.% ДГШ і 30 мас.% РТАВ є гідросилікати кальцію складу  $CSH(B)$ , гідроалюмінати кальцію  $C_4AH_{13}$ , які взаємодіючи з гіпсом, присутнім в складі РТАВ, утворюють еtringіт  $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$  вже в початковий період гідратації. Вільний  $CaO$ , присутній в складі РТАВ, швидко переходить в  $Ca(OH)_2$ , який з часом карбонізується. Характерною особливістю цієї системи також є карбонізація гідроалюмінатів кальцію з утворенням гідрокарбоалюмінату кальцію складу  $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CO_2 \cdot 12H_2O$ .

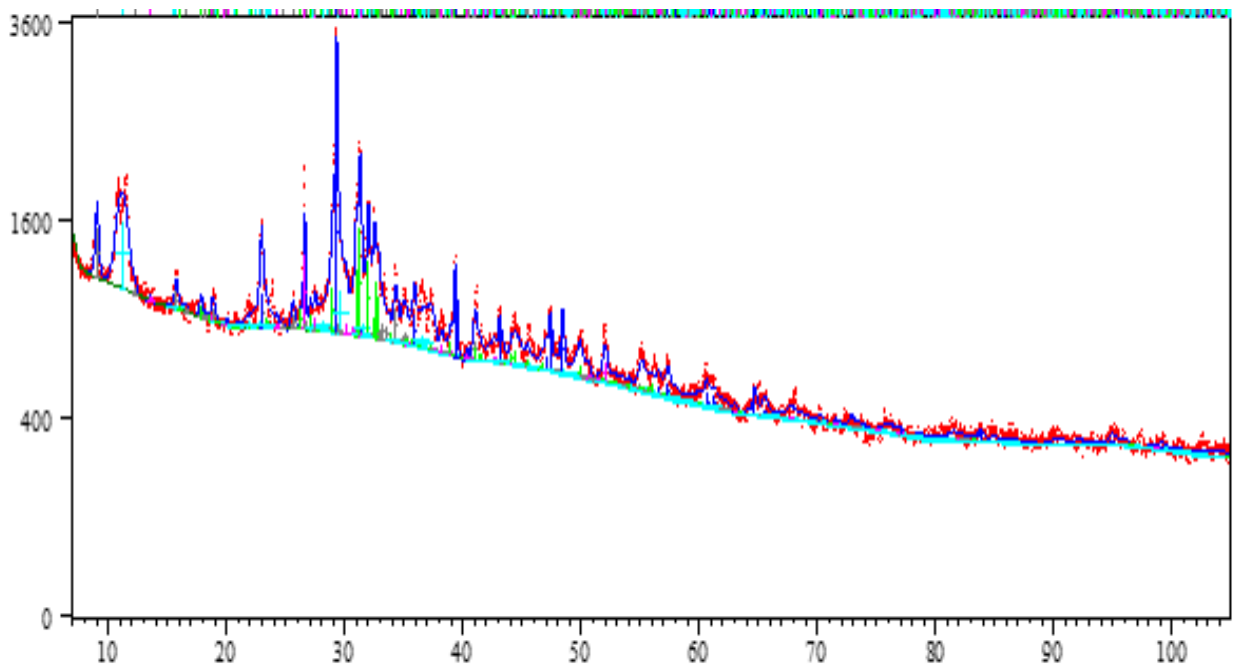


Рисунок 5.1. Дифрактограма гідратованої композиційної системи складу 70 мас.% ДГШ + 30 мас.% РТАВ у віці 28 діб

На мікрофотографіях системи ДГШ-РТАВ, гідратованої 28 діб (рисунок 5.2), відзначаються скупчення крупних кристалів алюмосилікатів кальцію, присутніх в шлаковій складовій.

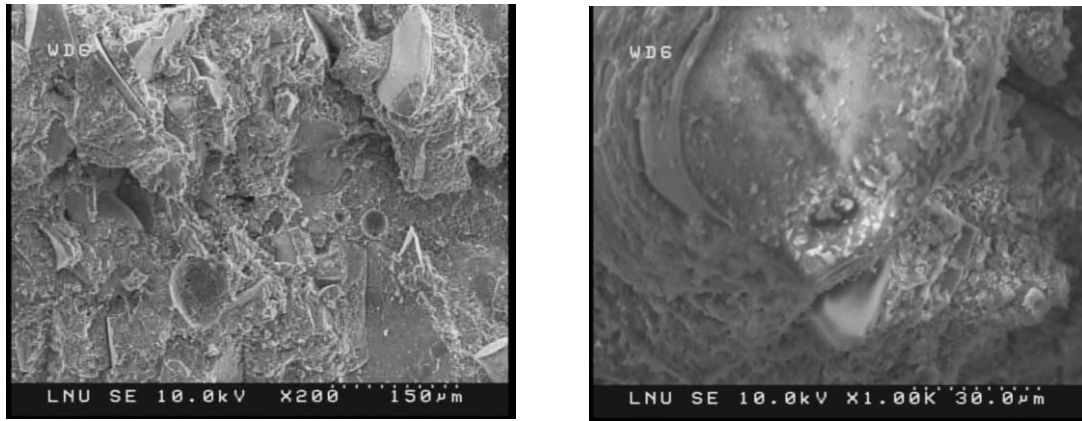


Рисунок 5.2 Мікроструктура гідратованої композиційної системи складу 70 мас.% ДГШ + 30 мас.% РТАВ у віці 28 діб

Як результат сумісної гідратації ДГШ і РТАВ, спостерігаються волокнисті кристали гідросилікатів кальцію та видовжені призматичні кристали еtringіту, що підтверджується результатами рентенофазових досліджень і добре корелюють з результатами фізико-механічних випробувань в'язучої композиційної системи ДГШ-РТАВ.

Таким чином, встановлена ефективність сумісного застосування доменного гранульованого шлаку та регульованих термоактивованих відходів у складі в'язучих систем при оптимальному співвідношенні компонентів ДГШ:РТАВ=70:30. Активізація шлакової складової під дією термоактивованих відходів та синергічний ефект, що проявляються при їх гідратації, забезпечують високі фізико-механічні показники затверділого композиту.

## 5.2 Використання регульованих термоактивованих відходів у шлаковмісних портландцементних системах

Приймаючи до уваги активну структуроутворюючу роль РТАВ в системі ДГШ-РТАВ, наступним етапом досліджень було вивчення ефективності використання добавки РТАВ до шлаковмісних портландцементів, які широко застосовуються в технології дорожнього цементобетону.

З цією метою були використані цементи з різним вмістом шлаку ПЦШ/А-Ш-500 та ПЦШ/Б-Ш-400. Добавка РТАВ в кількості 5-20 мас.% вводились при сумісному розмелюванні компонентів до залишку 5-6 мас.% на ситі №008.

Як показали одержані результати (таблиця 5.2), із збільшенням вмісту РТАВ відбувається незначне зростання нормальної густоти цементного тіста. Терміни тужавіння при цьому скорочуються, особливо в композиційних системах на основі ПЦІ/А-Ш-500. Так, при введенні до її складу 20 мас.% РТАВ початок тужавіння скорочується до 35 хв. Це свідчить про недоцільність використання добавки РТАВ в досліджених шлаковмісних портландцементних системах в кількості, що перевищує 10 мас.%.

Таблиця 5.2

Вплив добавки РТАВ на технологічні властивості шлаковмісних  
портландцементів

№	Склад композиційної системи, мас.%		Нормальна густина цементного тіста	Терміни тужавіння цементного тіста, год:хв	
	ПЦІ/А-Ш-500	РТАВ		Початок	Кінець
1	100,0	0,0	0,32	1:30	3:20
2	95,0	5,0	0,33	1:25	3:10
3	90,0	10,0	0,34	1:15	2:45
4	80	20,0	0,36	0:35	2:15
	ПЦІ/Б-Ш-400	РТАВ			
5	100,0	0	0,28	1:40	4:10
6	95,0	5,0	0,29	1:35	3:55
7	90,0	10,0	0,31	1:30	3:50

Аналіз результатів, отриманих при вивченні впливу РТАВ на міцність шлаковмісних портландцементів (таблиця 5.3), показав, що добавка як 5 мас% РТАВ, так і 10 мас.% РТАВ призводить до сповільнення темпу набору міцності в початковий період тверднення. Про це свідчить міцність зразків у віці 7 діб. Але через 28 діб тверднення зразки, усіх досліджених складів досягли марочної міцності (таблиця 5.3).

При цьому слід зазначити, що найвищих значень міцності, як на розтяг при згині, так і при стиску, досягли зразки, в складі яких 5,0 мас.% портландцементів ПЦІ/А-Ш-500 та ПЦІ/Б-Ш-400 були замінені на 5,0 мас.% РТАВ.

Вплив добавки РТАВ на міцність шлаковмісних  
портландцементів (EN 197)

№	Склад композиційної системи, мас.%		Міцність на розтяг при згині, МПа, у віці, діб		Міцність на стиск, МПа, у віці, діб	
	ПЦІІ/А-Ш-500	РТАВ	7	28	7	28
1	100,0	0,0	6,8	7,3	49,8	53,2
2	95,0	5,0	6,7	7,8	48,7	55,0
3	90,0	10,0	6,5	7,5	42,8	52,2
	ПЦІІ/Б-Ш-400	РТАВ				
5	100,0	0,0	6,2	7,1	34,5	44,7
6	95,0	5,0	6,1	7,4	33,8	46,2
7	90,0	10,0	5,7	7,2	32,4	43,3

Таким чином, регульовані термоактивовані відходи паперового виробництва в досліджуваній композиційній системі відіграють роль додаткового цементуючого матеріалу. Заміна 5,0 мас.% портландцементу на 5,0 мас.% РТАВ зменшує частку найбільш енергоємної клінкерної складової, що відповідає сучасним тенденціям, спрямованим на економію поливно-енергетичних ресурсів із широким залученням у виробництво відходів промисловості.

Використання регульованих термоактивованих відходів як додаткового цементуючого матеріалу в складі шлаковмісних портландцементів відкриває нові можливості в технології дорожніх цементобетонів.

### 5.3 Оптимізація складів дорожнього цементобетону з регульованими термоактивованими відходами

З метою забезпечення оптимального співвідношення між суперпластифікатором (СП) та РТАВ для отримання прогнозованих властивостей бетону на основі композиційних в'язучих систем, проведено оптимізацію складу бетону в заданому інтервалі зміни кількісного співвідношення РТАВ  $x_1$  (0 – 10 мас.%) та хімічної добавки  $x_2$  (0,6 - 1,0 мас.%) методом математичної статистичної обробки результатів, а саме методом ортогонального центрально-композиційного планування (ОЦКП). Наведений метод дає змогу суттєво

зменшити час проведення експерименту, його вартість, впорядкувати пошук оптимальних умов, отримати математичну модель об'єкту дослідження. Основні принципи застосування статистичних моделей для вирішення технологічних завдань висвітлені у праці [108].

Зміст планування експерименту з використанням даного методу полягає у пошуку математичних залежностей між визначеними властивостями і факторами впливу, що їх змінюють. Значення плану експерименту наведені у таблиці 5.4.

Таблиця 5.4

Значення плану експерименту

Рівень	Вміст додатків мас.%	
	СП ( $X_1$ ), % від мас. в'язучого	РТАВ ( $X_2$ ), мас.%
Основний "0"	0,6	0
Нижній "-1"	0,8	5
Верхній "+1"	1,0	10

Розрахунок коефіцієнтів регресії для отриманих результатів, а також побудова ізоліній міцності при  $y_j = \text{const}$  виконана на ПК за спеціально складеними програмами. В програмі використано матричний підхід до регресивного аналізу і розрахунку коефіцієнтів регресії.

Отримані результати розрахунку коефіцієнтів регресії приведені в таблиці 5.5. Аналіз наведених коефіцієнтів дозволяє зробити ряд технологічних висновків. Так, від'ємні знаки при коефіцієнтах регресії  $b_2$  та  $b_{22}$  вказують на негативний вплив добавки РТАВ, а також її сумісної дії із суперпластифікатором на міцність на стиск у початковий період тверднення бетонів (1 доба) і позитивний у подальші терміни (28 діб). Максимальний вміст додаткового цементуючого матеріалу (коефіцієнт  $b_{11}$ ), а також хімічного додатку має негативний вплив на показники міцності бетону на стиск протягом усіх досліджених термінів тверднення, на що вказують знаки при коефіцієнтах регресії.



## Коефіцієнти регресії

Функції відгуку	Коефіцієнти регресії					
	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_{11}$	$b_{22}$	$b_{12}$
$Y_1$	8,422	0,233	-0,300	-0,533	-0,233	0,100
$Y_2$	23,600	-1,700	-1,417	-4,200	-0,450	-2,475
$Y_3$	61,664	4,517	-2,400	1,483	-0,467	1,150

Матриця двофакторного математичного планування експерименту та результати випробувань наведені у таблиці 5.6.

Визначення міцності дорожнього бетону з вмістом регульованих термоактивованих відходів проводили згідно з вимогами ДСТУ Б В.2.7-187:2009.

За результатами фізико-механічних випробувань бетонів (Таблиця 5.6) встановлено, що в залежності від співвідношення мінеральної та хімічної добавок, спостерігається їх різний вплив на фізико-механічні властивості бетонів.

На основі отриманих коефіцієнтів складені рівняння регресії, досліджуваних функцій та побудовані ізолінії міцності на розтяг при згині ( $Y_1 = \text{const}$ ) (рисунок 5.3) та на стиск через 1 і 28 діб тверднення ( $Y_2, Y_3 = \text{const}$ ) (рисунок 5.3-5.4). Аналіз одержаних математичних залежностей, а також їх графічне відображення, дають змогу визначити оптимальні кількості мінеральної добавки (РТАВ) та хімічної добавки-суперпластифікатора, що становлять відповідно 5 мас. % РТАВ та 0,8 мас.% пластифікуючої добавки Stachement 2570 і забезпечує високу ранню і проектну міцність бетону при жорсткості бетонної суміші 4-8 с.

Таблиця 5.6

## Матриця планування і результати повного двофакторного експерименту

№ п/п	Матриця планування						Stachement 2570, мас.%	РТАВ, об.%	Границя міцності зразків на згин, МПа	Границя міцності зразків на стиск, МПа, у віці, діб	
	x0	x1	x2	x1 x2	$x_1^2$	$x_2^2$				1	28
1	1	1	1	1	1	1	1,3	10	7,7	14,7	67,4
2	1	-1	1	-1	1	1	0,7	10	8,1	20,8	68,3
3	1	1	-1	-1	1	1	1,3	0	7	22,4	55,8
4	1	-1	-1	1	1	1	0,7	0	7,8	18,6	61,3
5	1	-1	0	0	1	0	0,7	5	8,1	16,7	66,3
6	1	1	0	0	1	0	1,3	5	7,7	21,4	57,8
7	1	0	-1	0	0	1	1,0	0	7,9	19,7	56,1
8	1	0	1	0	0	1	1,0	10	8,5	25,9	64,1
9	1	0	0	0	0	0	1,0	5	8,4	24,3	63,8

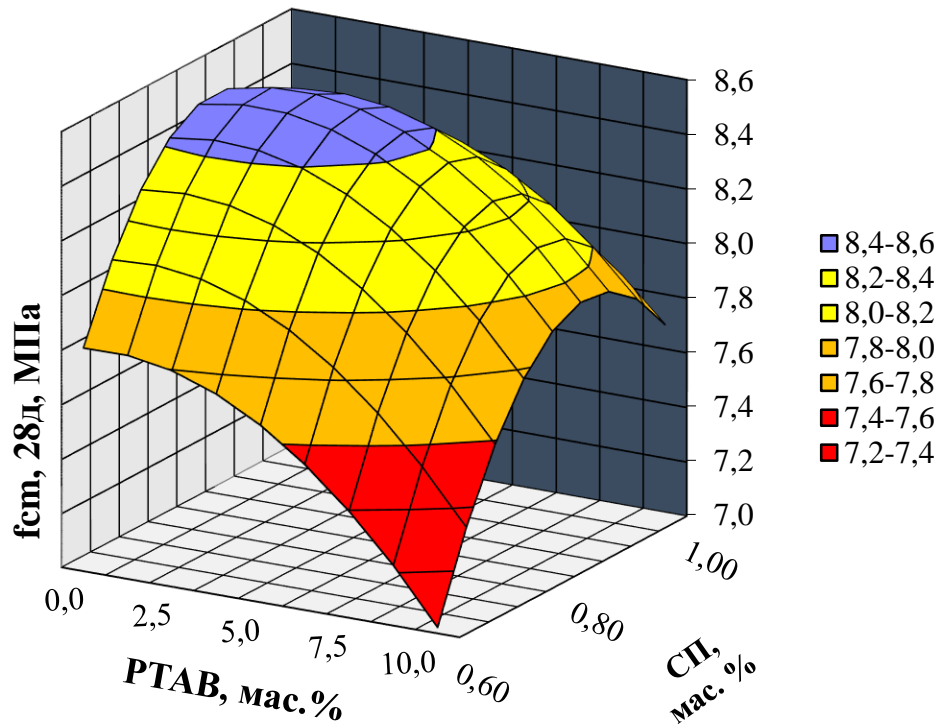


Рисунок 5.3. Поверхня міцності на розтяг при згині у віці 28 діб

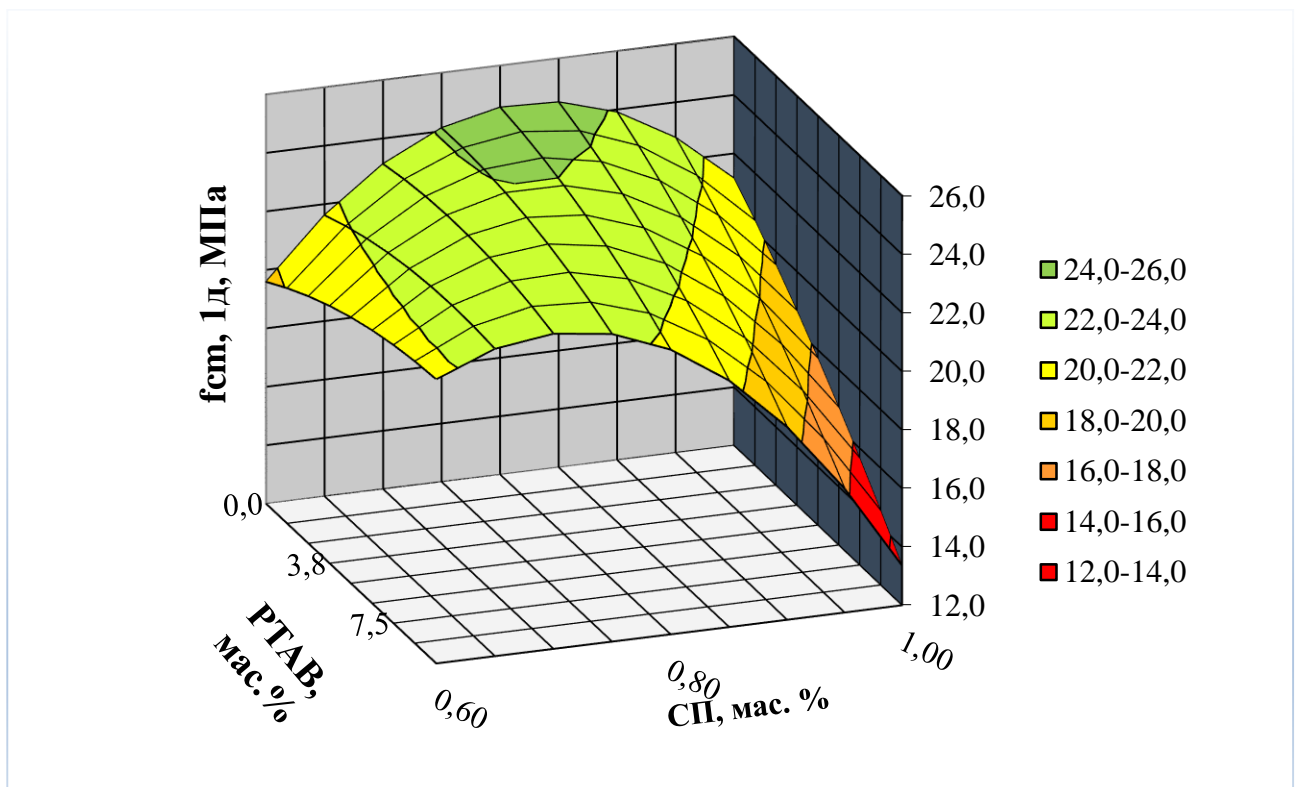


Рисунок 5.4. Поверхні міцності при стиску у віці 1 доби тверднення

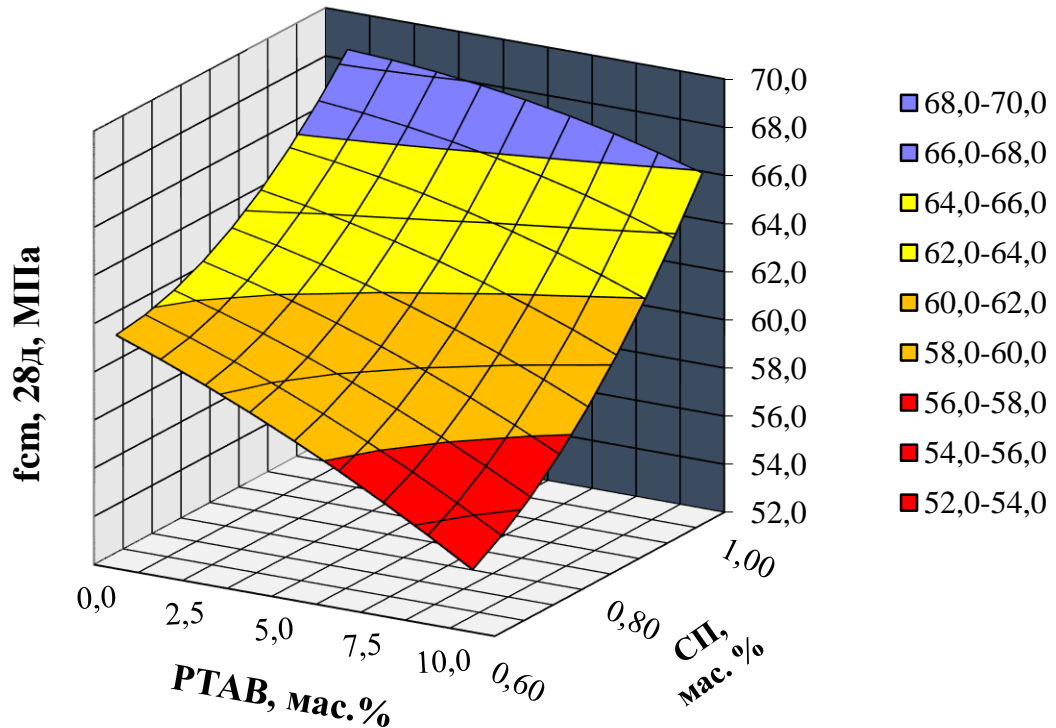


Рисунок 5.5. Поверхні міцності при стиску у віці 28 діб тверднення

Таким чином, дослідження підтвердили, що визначення оптимальної кількості РТАВ та суперпластифікатора є ключовим фактором у формуванні міцності бетону на розтяг при згині та міцності на стиск у ранні терміни тверднення.

#### 5.4 Вплив регульованих термоактивованих відходів на властивості дорожніх цементобетонів

Цементобетонне дорожнє покриття є однією з найбільш матеріалоємних та енергозатратних конструкцій у дорожньому будівництві [98]. Використання РТАВ для часткової заміни в'язучого при виробництві дорожнього цементобетону дасть змогу не тільки знизити вартість цементобетону, але і зменшити негативний вплив дорожнього будівництва на навколишнє середовище. Тому доцільно дослідити можливість використання РТАВ у ролі додаткового цементуючого матеріалу для заміни частини портландцементу в бетоні дорожнього покриття.

Відомо [110], що з точки зору досягнення довговічності дорожнього цементобетону, ефективним є використання у його складі шлакомістких

портландцементів. Також, зважаючи на синергічний ефект в результаті активізації процесів гідратації в композиційних системах, що містять доменний гранульований шлак ДГШ та регульовані термоактивовані відходи РТАВ (Розділ 5.1), для приготування бетонних сумішей використовували портландцементи ПЦ II /А-III -500 та ПЦ II / Б-III-400.

Підбір складу жорстких бетонних сумішей проводився з розрахунку витрати цементу  $350 \text{ кг/м}^3$ , частина якого – 5,0 мас.% і 10 мас.% - замінювалась відповідною кількістю РТАВ. Кількість заповнювачів для всіх складів була постійною і становила  $670 \text{ кг/м}^3$  піску та  $1315 \text{ кг/м}^3$  щебеню. Крім того, до складу всіх бетонних сумішей вводили 0,8 мас.% суперпластифікатора та 0,2 мас.% повітровтягувальної добавки. Їх використання у дорожньому цементобетоні є обов'язковим, оскільки вони збільшують вміст повітря у бетонній суміші на 2-5% за об'ємом, що забезпечує підвищення морозостійкості бетону у 2 рази та більше [100-102]. Крім того, застосування повітровтягувальних добавок має додатковий ефект, що проявляється в пластифікації бетонної суміші та підвищенні марки бетону за водонепроникністю. В таблиці 5.7 наведені склад в'язучого та властивості цементобетонних сумішей.

Таблиця 5.7

Вплив складу в'язучого на властивості цементобетонних сумішей

№	Витрата в'язучих, $\text{кг/м}^3$			В/Т	Середня густина суміші, $\text{кг/м}^3$	Жорсткість с	Об'єм втягнутого повітря, %
	ПЦ II/А-III-500	ПЦ II/Б-III-400	РТАВ				
1	350		-	0,42	2382	3	4.7
2	332.5		17.5	0,42	2367	4	4.9
3	315		35	0,42	2334	5	5.1
1'	-	350	-	0.42	2320	3	5.5
2'	-	332.5	17.5	0.42	2360	4	5.2
3'	-	315	35	0.42	2390	5	5.0

Перемішування бетонної суміші здійснювалось у лабораторному змішувачі примусової дії. Дослідження проводились на зразках - 10x10x10см та призмах розміром 10x10x40см. Зразки зберігались при нормальних умовах тверднення - вологості 95±5% та температурі 20°C.

Жорсткість бетонної суміші вимірювали за допомогою приладу Красного. Встановлено, що введення РТАВ дещо підвищує жорсткість бетонних сумішей при сталому В/Т, що зумовлено з пористістю даного компоненту (таблиця 5.7). Водночас, бетонні суміші на основі ПЦШ/Б-Ш-400 характеризуються кращим збереженням рухливості в часі. Так, через 1 год. після замішування жорсткість бетонних сумішей зростає на 9 та 6 с для складів 3 і 3' відповідно. Це пов'язано із значною пористістю РТАВ, завдяки якій відбувається поглинання води замішування структурою термоактивованих відходів та зниження легкоукладальності бетонної суміші (рисунок 5.6).

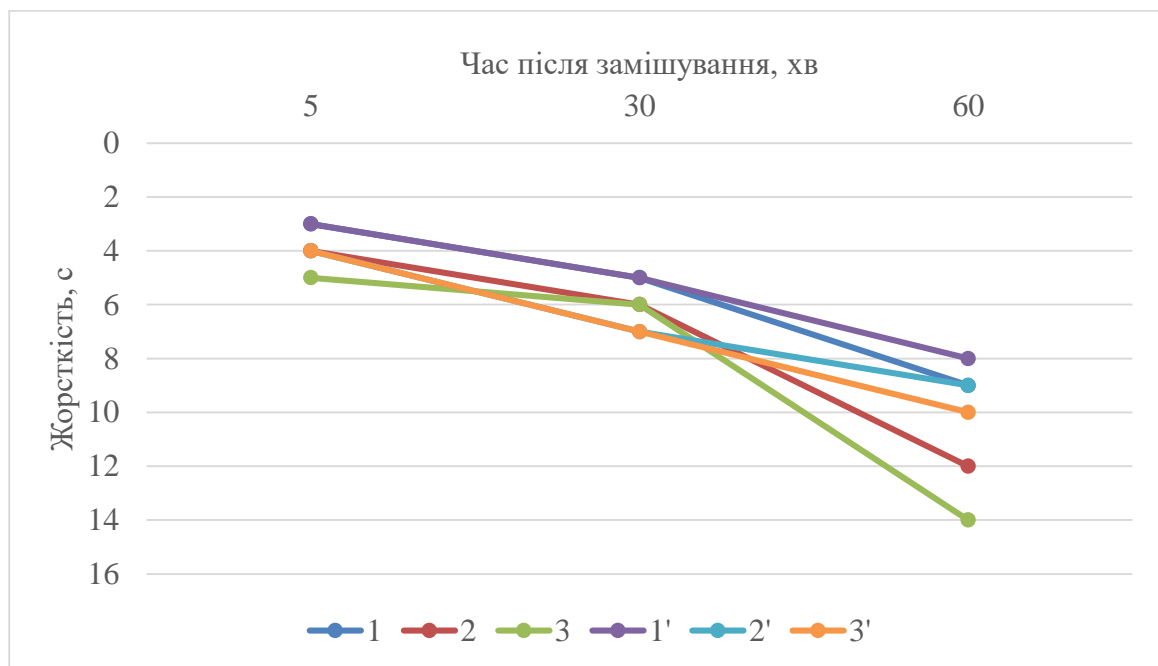


Рисунок 5.6. Збереження рухливості бетонних сумішей в часі

Результати визначення водопоглинання та відкритої пористості досліджуваних бетонів на основі ПЦ П/А-Ш-500 (рисунок 5.7) показують, що заміна портландцементу на РТАВ дещо покращує обидві ці характеристики. Дані свідчать, що відкрита пористість зразків із заміною 10 мас.% цементу на РТАВ зменшилася на 11% у порівнянні з бетоном без добавок. Це пов'язано з кращою

упаковкою дрібних частинок у бетоні з регульованими термоактивованими відходами, а також з особливостями процесів його структуроутворення, що сприяє зменшенню діаметру капілярних пор, і загалом, підвищує непроникність композиту.

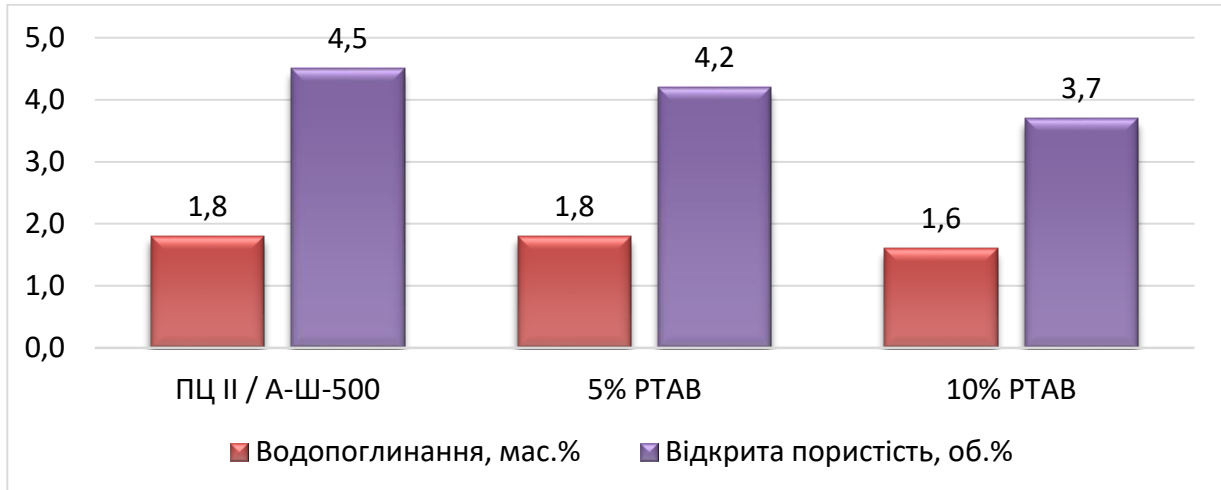


Рисунок 5.7 Водопоглинання та відкрита пористість бетонів на основі ПЦ II/А-Ш-500 з добавкою РТАВ

Виявлена залежність між щільністю структури та вмістом РТАВ зберігається і для бетону на ПЦ II/Б-Ш-400. Так, при заміні 5 мас.% і 10 мас.% цементу ПЦ II/Б-Ш-400 на таку саму кількість РТАВ, водопоглинання знизилось відповідно на 6,16% і 14,3% (рисунок 5.8). При цьому також варто відзначити, що водопоглинання бетонів на основі ПЦ II/Б-Ш-400 майже у 2 рази нижче, ніж у бетонах на основі ПЦ II/А-Ш-500.

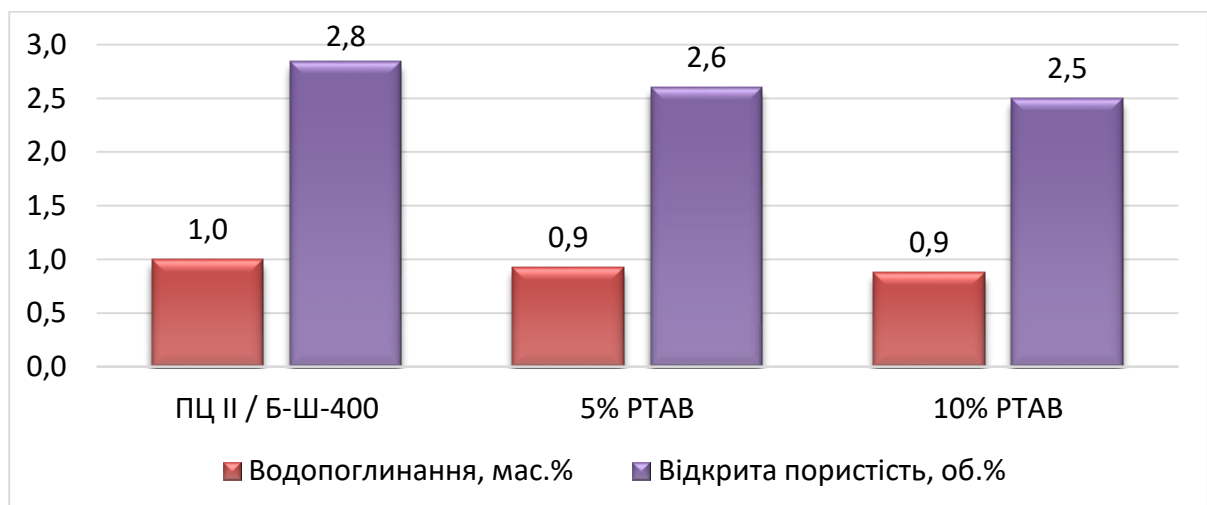


Рисунок 5.8 Водопоглинання та відкрита пористість бетонів на основі ПЦ II/Б-Ш-400 з добавкою РТАВ

Результати по визначенню глибини проникнення води під тиском (рисунок 5.9) корелюють з показниками відкритої пористості і водопоглинання та служать додатковим підтвердженням важливої ролі РТАВ у процесах структуроутворення клінкерних композиційних систем та синергічної взаємодії доменного гранульованого шлаку із регульованими термоактивованими відходами.

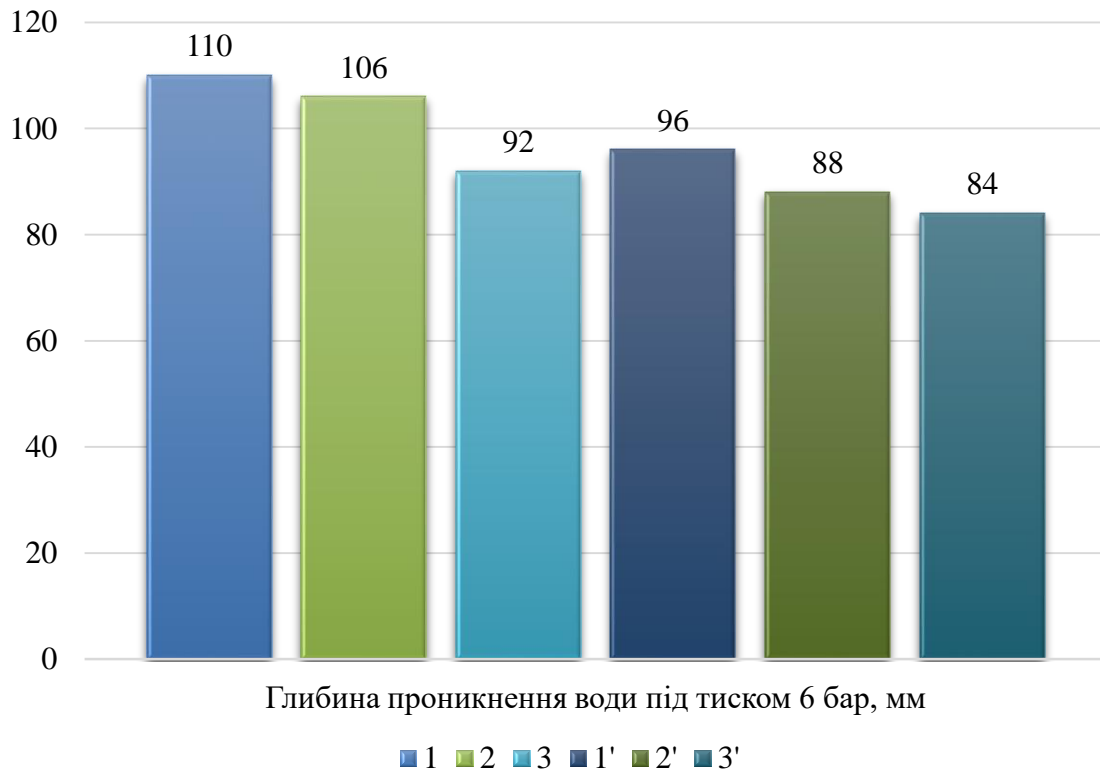


Рисунок 5.9. Водонепроникність бетонів з добавкою РТАВ

Як видно з рисунку 5.9, глибина проникнення води у бетон є приблизно на 6 та 15% нижчою для складів, що містять 5 і 10 мас.% РТАВ відповідно, порівняно з контрольними зразками бетонів на основі портландцементів обох типів.

Досліджувані бетони випробовували на 3, 7, 28, 56 і 180 добу тверднення для визначення міцності на стиск (таблиця 5.8) та на 3, 28, 180 добу для визначення міцності на розтяг при згині (таблиця 5.9).



## Вплив добавки РТАВ на міцність бетонів на стиск

№ складу	Границя міцності на стиск, МПа, у віці, діб				
	3	7	28	56	180
1	39,6	46,4	64,8	64,8	69,9
2	39,3	44,9	63,9	63,9	69,7
3	36,3	41,5	61,4	61,4	65,3
1'	16,4	30,3	42,3	49,2	56,7
2'	14,1	28,5	41,7	48,1	57,1
3'	11,3	25,5	39,0	46,4	54,3

Аналізуючи отримані результати, слід відзначити незначне зниження стандартної міцності бетону на стиск із збільшенням кількості РТАВ у його складі, проте на 180 добу тверднення міцність зразків бетону складів 2 та 2' з добавкою 5 мас.% РТАВ дорівнює міцності контрольних зразків без добавки РТАВ (склади 1 та 1'). Стандартна міцність на стиск бетону складу 2 відповідає класу С40/50, а складу 2' – класу С 32/40.

Раніше встановлена тенденція до зростання міцності на розтяг при згині цементно-піщаних зразків з додаванням РТАВ зберігається також для важких дорожніх бетонів з вмістом втягнутого повітря. Так, для зразків з добавкою 5 мас.% РТАВ на основі ПЦІ/Б-Ш-400 міцність на розтяг при згині у віці 180 діб становить 10,1 МПа, що є найвищим показником серед досліджуваних зразків (таблиця 5.9). Водночас, міцність зразків складів 2 і 2', визначена у віці 28 діб, є майже однаковою, та відповідає класу на згин  $V_{tb}$  6,4.

## Вплив добавки РТАВ на міцність бетонів на розтяг при згині

№ складу	Границя міцності бетону на розтяг при згині, МПа, у віці, діб		
	3	28	180
1	6,3	8,7	8,9
2	6,4	8,5	9,2
3	5,5	7,8	8,6
1'	4,9	8,8	9,8
2'	4,6	8,7	10,1
3'	4,1	8,3	9,4

При цьому міцність на розтяг при згині бетону з добавкою 5 мас.% РТАВ (склад 2') через 180 діб тверднення на 13% перевищує міцність еталонного зразка без добавки РТАВ на основі ПЦ II/A-III-500.

Це може бути пов'язано з пролонгованою гідратацією в'язучого та значною активністю як РТАВ, так і ДГШ, а також оптимальним співвідношенням цих додаткових цементуючих компонентів у складі композиційної системи.

Як відомо [111], одним із найважливіших показників довговічності дорожніх цементних бетонів є їх тріщиностійкість, оскільки процес руйнування цементобетонного покриття під дією зовнішніх чинників (колісні навантаження, температурно-вологісні деформації, агресивні середовища) проходить шляхом утворення та поширення в його структурі мікро- та макротріщин.

Отримані з рівноважних випробувань повні діаграми стану (рисунок 5.10) досліджених бетонів, та розраховані на їх основі силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості (таблиця 5.10) дають можливість якісно оцінити вплив РТАВ на тріщиностійкість композиційних систем на макрорівні.

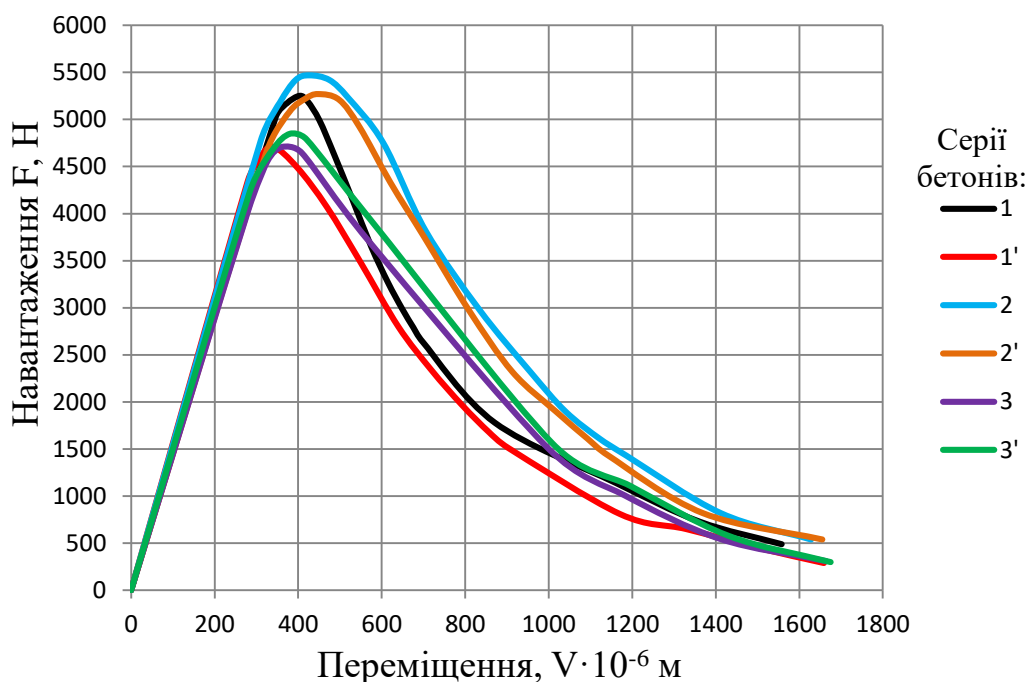


Рисунок 5.10 Повні діаграми стану досліджених бетонів

Аналіз отриманих повних діаграм стану бетонів свідчить про позитивний ефект від заміни портландцементу 5 мас.% РТАВ на роботу бетону як в докритичній ( $G_i = 225-230$  Дж/м<sup>2</sup>), так і в закритичній ( $G_F = 650-607$  Дж/м<sup>2</sup>) стадіях. Бетони складів 2 і 2' з добавкою 5 мас.% РТАВ характеризуються найвищими статичними критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_i = 0,96-0,98$  МПа·м<sup>1/2</sup>.

Таблиця 5.10

Силві та енергетичні характеристики тріщиностійкості досліджуваних бетонів

Серія бетону	Міцність на розтяг при згині $f_{ctfm}$ , МПа	Модуль пружності при згині $E_{tb} \cdot 10^{-3}$ , МПа	Статичний розрахунковий модуль пружності бетону $E_b$ , МПа	Критерій крихкості $X_{tb} \cdot 10^{-4}$ , м
1	11,10	116,3	4019	176
1'	9,96	88,6	4309	217
2	11,56	144,6	4262	207
2'	11,14	150,5	3979	195
3	9,96	91,5	3987	217
3'	10,25	109,4	4126	218

Силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості  
досліджуваних бетонів

Серія бетону	$W_m \cdot 10^{-2}, \text{Н}\cdot\text{м}$ ( $S_{OTCA}$ )	$W_e \cdot 10^{-2}, \text{Н}\cdot\text{м}$ ( $S_{ACH}$ )	$W_l \cdot 10^{-2}, \text{Н}\cdot\text{м}$ ( $S_{OTCH}$ )	$W_L \cdot 10^{-2}, \text{Н}\cdot\text{м}$ ( $S_{HCDK}$ )	$W_{ш} \cdot 10^{-2}, \text{Н}\cdot\text{м}$ ( $S_{OCUM}$ )	$G_i, \text{Дж}/\text{м}^2$	$G_l, \text{Дж}/\text{м}^2$	$G_F, \text{Дж}/\text{м}^2$	$J_i, \text{Дж}/\text{м}^2$	$K_i, \text{МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$
1	21,82	94,99	116,81	229,59	47,04	195	38	541	116	0,88
1'	17,15	71,31	88,46	227,78	35,31	147	38	498	89	0,80
2	37,71	97,23	134,94	292,48	48,15	225	49	650	145	0,98
2'	41,48	96,67	138,15	267,82	47,87	230	45	607	150	0,96
3	16,00	77,07	93,07	246,31	38,17	155	41	539	92	0,79
3'	25,77	78,97	104,74	254,69	39,11	175	42	556	109	0,85

Важливе значення для стримування процесів розвитку та злиття мікротріщин має структура матриці в'язучого, зокрема наявність у ній неоднорідностей, таких як пори гелю, мікрокапіляри, поверхні поділу фаз [111-113]. Присутність у структурі композиційної системи завдяки сульфатно-лужній активації РТАВ як додаткового цементуючого матеріалу, зумовлює значний приріст показників тріщиностійкості бетону. Тому, не зважаючи на дещо нижчі фізико-механічні властивості бетону на основі ПЦІ/Б-Ш-400 з добавкою 10 мас.% РТАВ, характеристики його тріщиностійкості перевищують відповідні показники складів 1 та 1' без добавки без РТАВ. Це підтверджує ефективність синергізму взаємодії регульованих термоактивованих відходів з доменним гранульованим шлаком при оптимальному співвідношенні компонентів у контексті механіки руйнування.

Однією з найважливіших характеристик дорожнього цементобетону є здатність опиратися впливу знакозмінних температур у насиченому соляним розчином стані. Морозостійкість визначали згідно ДСТУ Б В.2.7-49-96 випробуванням зразків попередньо насичених 5% розчином хлористого натрію. Одержані результати, наведені у Таблиці 5.12, свідчать, що введення до складу дорожнього цементобетону РТАВ дещо знижує його морозостійкість. Проте бетон з вмістом 5 мас.% РТАВ на основі обох типів портландцементів характеризується

маркою за морозостійкістю F300, що є достатнім для застосування його у верхніх шарах дорожнього одягу.

Таблиця 5.12

Вплив РТАВ на морозостійкість та стиранисть дорожніх цементобетонів

№ складу	Втрати маси після 37 циклів заморожування-відтавання, %	Спад міцності після 37 циклів заморожування-відтавання, %	Стираність G, г/см <sup>2</sup>
1	0,8	3,3	0,27
1'	1,0	3,9	0,26
2	2,2	3,8	0,26
2'	1,8	4,2	0,26
3	2,8	8,8	0,29
3'	3,1	8,1	0,28

Стираність бетону незначно змінюється із введенням 5 мас.% РТАВ (Таблиця 5.12), проте заміна 10 мас.% портландцементу обох типів на РТАВ викликає збільшення стиранисті на 7% для складів 3 і 3' порівняно з складами 1 і 1'.

Таким чином, використання 5 мас.% регульованих термоактивованих відходів для заміни 5 мас.% портландцементу дещо підвищує фізико-механічні властивості шлаковмісних дорожніх цементобетонів, зокрема міцність на розтяг при згині у пізні терміни тверднення, а також силові та енергетичні характеристики тріщиностійкості розроблених бетонів. Водночас, застосування РТАВ підвищує водонепроникність та знижує пористість бетону, не погіршуючи їх морозостійкості.

### Висновки до Розділу 5

1. Проведені дослідження показали ефективність використання регульованих термоактивованих відходів в складі в'язучої композиційної системи «доменний гранульований шлак – регульовані термоактивовані відходи» за

рахунок активізації тверднення шлакової складової системи та синергічного ефекту, що забезпечує утворення додаткової кількості структурно-активних фаз при їх сумісній гідратації.

2. На основі проведених досліджень встановлено, що добавка регульованих термоактивованих відходів до шлаковмісних портландцементів ПЦ II/A-Ш-500 та ПЦ II/Б-Ш-400 в композиційній системі на їх основі проявляє властивості додаткового цементуючого матеріалу.

3. Методом математичного планування експерименту встановлено взаємозв'язок факторів складу (вміст суперпластифікатора Stachement і додаткового цементуючого матеріалу РТАВ) та фізико-механічних характеристик дорожнього цементобетону. Аналіз поверхонь функцій відгуку свідчить, що 5 мас. % РТАВ та 0,8 мас.% суперпластифікатора забезпечують активну кінетику набору ранньої міцності та найвищий рівень показників міцності бетону на розтяг при згині, що відповідає класу  $B_{тб} 6,4$  та досягнення класу бетону за міцністю на стиск С40/50.

4. Розроблено жорсткі бетонні суміші номінального складу 1:1,9:3,8 з вмістом 0,8 мас.% суперпластифікатора та 0,2 мас.% повітровтягувальної добавки Місоропан з міцністю на розтяг при згині 10,1 МПа у віці 180 діб, що є найвищим показником серед досліджуваних зразків. Введення РТАВ ущільнює структуру бетону та знижує його проникність, що підтверджується зниженням показників водопоглинання, глибини проникнення води та відкритої пористості на 5-15% порівняно з контрольними зразками без додаткового цементуючого матеріалу.

5. Аналіз результатів визначення силових та енергетичних характеристик тріщиностійкості бетонів свідчить про позитивний ефект від додавання 5 мас.% РТАВ на роботу бетону як в докритичній ( $G_i = 225-230$  Дж/м<sup>2</sup>), так і закритичній ( $G_F = 650-607$  Дж/м<sup>2</sup>) стадіях з найвищими статичними критичними коефіцієнтами інтенсивності напружень  $K_i = 0,96-0,98$  МПа·м<sup>1/2</sup>. Встановлено, що бетони з оптимальним вмістом РТАВ характеризуються значною стійкістю до попереминої дії замороження і відтавання з досягненням марки за морозостійкістю F300 та стираності  $G = 0,29$  г/см<sup>2</sup>.

## РОЗДІЛ 6

### ДОСЛІДНО-ПРОМИСЛОВА АПРОБАЦІЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕНЬ В КОНСТРУКЦІЯХ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ

#### 6.1 Промислова апробація регульованих термоактивованих відходів для укріплення ґрунтів

Укріплення ґрунтів в останні роки склали передумови для створення стійких дорожніх основ. Це особливо потрібно в тих регіонах, де відсутні кам'яні матеріали, а транспортування їх значно здорожчує роботи. Зниження вартості будівництва можливе при використанні в шарах дорожніх одягів укріплених ґрунтів. Особливо актуальним є застосування в якості в'язучих нетрадиційних вторинних ресурсів.

На практиці використовуються різноманітні методи укріплення ґрунтів, напрацьовані в результаті багаторічних лабораторних досліджень, найпоширенішим з яких є використання у якості в'язучих цементу або вапна.

За рекомендаціями, розробленими кафедрою «Автомобільні дороги та мости» Національного університету «Львівська політехніка» проводилось укріплення ґрунтів з використанням в якості в'язучих цементу і вапна при влаштуванні доріг на об'єкті «Нове будівництво ЦПС 35/110 кВ «Яворівська ВЕС/СЕС» на території Яворівського району Львівської області. Попередньо були проведені розрахунки дорожнього одягу і запропонована наступна його конструкція (рисунок 6.1).

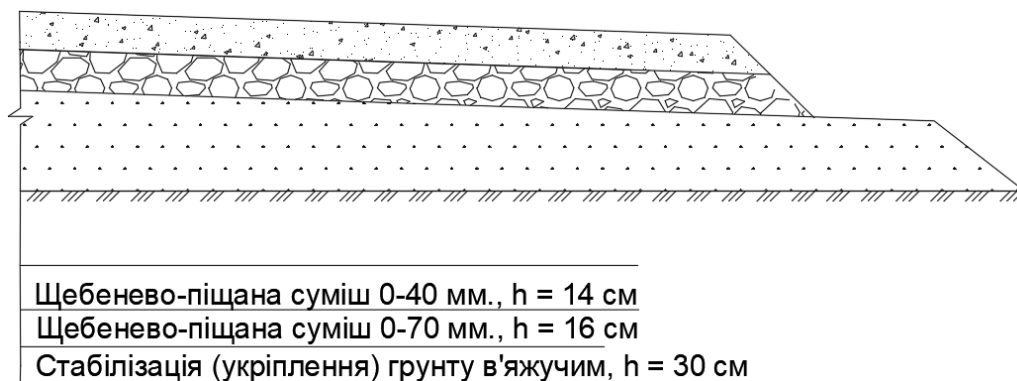


Рисунок 6.1 Конструкція дорожнього одягу

Для укріплення були підібрані склади сумішей ґрунтів з різними в'язучими. За цими рекомендаціями укріплювалась основна маса ґрунтів на об'єкті. Роботи виконувались ТОВ «Балтом Україна».

Методи укріплення ґрунтів весь час вдосконалювалися і знаходилися нові рішення по покращенню їх механічних властивостей. Одним з таких рішень було використання на цьому об'єкті у якості в'язучого розроблених регульованих термоактивованих відходів. Хоча основна маса ґрунтів була укріплена цементом, для дослідного використання регульованих термоактивованих відходів була виділена окрема ділянка (Акт впровадження в додатку Б).

При цьому до складу сумішей входило 8 мас.% регульованих термоактивованих відходів, а також для порівняння використовувались суміші, які містили 4 мас.% портландцементу.

Перед випробуваннями була розроблена технологічна послідовність виконання робіт по укріпленню ґрунтів з використанням термооброблених відходів паперового виробництва у якості в'язучого.

Технологічна послідовність включала:

- планування ґрунту автогрейдером;
- розподілення в'язучого на поверхні шару ґрунту дозатором;
- перемішування в'язучого з ґрунтом ресайклером WR 2500 у складі з поливально-миючою машиною;
- попереднє ущільнення шару самохідним котком на пневмоколiсному ході;
- планування та профiлювання шару автогрейдером;
- виправлення дефектних місць вручну;
- ущільнення шару самохідним ґрунтовим вібраційним котком;
- догляд за влаштованим шаром поливанням водою (за необхідності).

За даною технологічною послідовністю було укріплено 250 м<sup>3</sup> ґрунту з використанням термооброблених відходів паперового виробництва.

Після завершення робіт були відібрані проби ґрунту, укріпленого регульованими термоактивованими відходами та портландцементом. В лабораторних умовах було заформовано зразки-циліндри та визначено їх міцність



на стиск та морозостійкість. Результати проведених випробувань наведено в таблиці 6.1.

Таблиці 6.1

Фізико-механічні властивості укріплених ґрунтів

Номер складу	Умовне позначення складу	Міцність на стиск, МПа, через діб		Морозостійкість зразків, після циклів заморожування-відтавання		Марка за міцністю та морозостійкістю згідно ДСТУ 8801:2018
		7	28	15	25	
1	ПЦ 4	1.3	2.7	0.78	0.70	M20
2	РТАВ 8	1.2	2.6	0.77	0.71	M20

Встановлено що використання регульованих термоактивованих відходів в кількості 8 мас. % порівняно з 4 мас. % портландцементу забезпечило укріплення шару земляного полотна.

По завершенні робіт по спорудженню усіх шарів дорожнього одягу було проведено обстеження стану дослідної ділянки під'їзної дороги, яке засвідчило задовільні міцнісні, деформативні та експлуатаційні характеристики стану дорожнього одягу, влаштованого з використанням укріплення ґрунту регульованими термоактивованими відходами паперового виробництва.

За умови ефективного водовідведення, належного утримання та моніторингу стану дорожнього покриття прогнозується надійна експлуатація під'їзної дороги для потреб технологічного транспорту.

**6.2 Лабораторні випробування дорожніх цементобетонів з регульованими термоактивованими відходами паперового виробництва**

В ПП «Лабораторія ЗахідДорСервіс» проведено випробування дослідної партії цементобетонів з використанням регульованих термоактивованих відходів (РТАВ) (Акт лабораторних випробувань наведено

в додатку В).

Для приготування бетону було використано портландцемент ПЦ II / А-III-500 ПрАТ«Волинь-цемент», регульовані термоактивовані відходи (РТАВ) в кількості 5 мас.% та 10 мас.%, а також комплексний модифікатор (0,8 мас.% суперпластифікатора та 0,2 мас.% повітровтягувальної добавки). Склад цементобетону наведений в таблиці 6.2.

Таблиця 6.2

Склад та властивості бетонних сумішей

№	Витрата компонентів		Жорсткість, с	В/Т	Середня густина суміші, кг/м <sup>3</sup>
	ПЦ II / А-III-500, кг/м <sup>3</sup>	РТАВ, кг/м <sup>3</sup>			
1	350	-	5	0,42	2364
2	332,5	17,5	7	0,42	2398
3	315	35	9	0,42	2312

Показано, що використання РТАВ як додаткового цементуючого компоненту у складі жорстких цементобетонних сумішей сприяє підвищенню міцності на розтяг при згині розроблених композитів. Результати проведених досліджень наведені в таблиці 6.3.

Таблиця 6.3

Міцність дорожніх цементобетонів

№	Границя міцності на стиск, МПа, у віці, діб			Границя міцності на розтяг при згині, МПа, у віці, діб	
	3	7	28	3	28
1	39,3	46,1	64,5	6,2	8,6
2	39,5	45,1	63,7	6,5	8,7
3	36,5	41,0	61,1	5,4	7,6

Як видно з результатів наведених в таблиці 6.3, міцність бетонів з добавкою РТАВ свідчить про доцільність їх використання у дорожньому будівництві.

Незважаючи на дещо нижчі показники міцності на стиск у віці 28 діб, найвищою міцністю на розтяг при згині характеризуються склади з вмістом 5 мас.% РТАВ.

На основі лабораторних випробувань дорожніх цементобетонів, проведених ПП «Лабораторія ЗахідДорСервіс», розраховано очікуваний економічний ефект від впровадження розробленої технології використання РТАВ як додаткового цементуючого матеріалу в складі бетону.

Економічний ефект від використання запропонованої технології, яка передбачає використання РТАВ при укладанні дорожнього покриття порівняно з існуючою технологією базується на різниці вартості матеріалів до і після впровадження.

Оцінка ефективності використання РТАВ при укладанні цементобетонного покриття проводилася за різницею собівартості одиниці продукції ( $E = C_1 - C_2$ )

$$E = (C_1 - C_2) \times A$$

де,  $E$  – очікуваний економічний ефект від впровадження з нової технології;

$C_1$  і  $C_2$  – собівартість одиниці продукції, виготовленої за існуючою базовою і новою технологією;

$A$  – об'єм випуску продукції для спорудження 1 км дорожнього покриття, м<sup>3</sup>.

Грунтуючись на сучасних цінах сировинних складників та витрат компонентів бетону, проведено розрахунок статей витрат та собівартості для приготування 1 м<sup>3</sup> цементобетонних сумішей (таблиця 6.4) та визначено очікуваний економічний ефект.

Розрахунок витрат та вартості матеріалів при використанні РТАВ в якості  
додаткового цементуючого матеріалу

Стаття витрат	Одиниці виміру	Вартість одиниці, грн	Базовий варіант ПЦ II/A-III-500		Новий варіант 5% цементу ПЦ II/A-III-500 замінено на 5% РТАВ	
			Витрата на 1 м <sup>3</sup>	Вартість на 1 м <sup>3</sup> , грн.	Витрата на 1 м <sup>3</sup>	Вартість на 1 м <sup>3</sup> , грн.
ПЦ II А-III-500	т	3360	0.350	1176.0	0.332	1117.2
Пісок	т	230	0.670	154.1	0.670	154.1
Щебінь 5-20	т	700	1.315	920.5	1.315	920.5
Пластифікатор	кг	29	1.99	57.7	1.99	57.7
Повітровтягу- вальна добавка	кг	50	0.05	2.5	0.05	2.5
РТАВ	т	1100	-	-	0.0175	19.3
Всього				2310.8		2271.3

Встановлено, що використання РТАВ при виготовленні цементних дорожніх бетонів для спорудження 1 км покриття дозволяє одержати загальний економічний ефект в розмірі

$$E = (2310,8 - 2271,3) \times (8,5 \times 1000 \times 0,28) = 94\,010 \text{ грн.}$$

Розглянувши результати проведених розрахунків, можна зробити висновок про економічну ефективність використання РТАВ в дорожньому будівництві, що в світлі останніх подій, пов'язаних з значною руйнацією інфраструктури країни, в тому числі і дорожньої, є беззаперечним економічним плюсом запропонованої технології.

Теоретичні, технологічні та методологічні розробки, наведені в

дисертаційній роботі, використовуються в навчальному процесі (додаток Г) та виконані науково-дослідних робіт в Національному університеті «Львівська політехніка».

## **Висновки до розділу 6**

1. У виробничих умовах на об'єкті «Нове будівництво ЦПС 35/110 кВ «Яворівська ВЕС/СЕС» на території Яворівського району Львівської області проведені роботи по укріпленню ґрунтів з використанням в якості в'язучого регульованих термоактивованих відходів паперового виробництва. Встановлено, що використання РТАВ в кількості 8 мас.% порівняно з 4 мас.% портландцементу сприяло процесу направленої структуроутворення, що забезпечило ефективне укріплення шару земляного полотна.

2. Проведено лабораторні випробування дослідної партії цементобетонів з використанням регульованих термоактивованих відходів. Результати випробувань підтвердили доцільність їх використання в дорожньому будівництві в якості додаткового цементуючого матеріалу.

3. Очікуваний економічний ефект від використання РТАВ як додаткового цементуючого матеріалу в дорожніх цементобетонах складає 94 тис. грн. при спорудженні 1 км покриття автомобільної дороги II категорії.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено можливість використання термоактивованих відходів паперової промисловості в композиційних системах для дорожнього будівництва.

2. Фізико-хімічними дослідженнями показано, що при використанні макулатурного скопу - продукту переробки макулатури в якості альтернативного палива відбувається утворення термоактивованих відходів, до складу яких входять гідравлічно активні фази - алюмінати кальцію  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  та силікат кальцію  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ .

3. Встановлено, що необхідною умовою, яка забезпечує гідратаційне тверднення термоактивованих відходів є обов'язкове регулювання процесів раннього структуроутворення, оскільки їм властива швидка гідrataція, яка супроводжується бурхливим тепловиділенням і швидким тужавінням. Для забезпечення нормального ходу процесів гідrataції, підвищення міцності та досягнення технологічно обґрунтованих термінів тужавіння композиційних систем використовувалась комплексна функціональна добавка, яка включала 7,0 мас%  $\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  та 1,0 мас% винної кислоти, що дозволило отримати регульовані термоактивовані відходи.

4. Дослідження процесів структуроутворення регульованих термоактивованих відходів показали, що гідратаційною фазою, яка забезпечує сповільнення процесу тужавіння і ранню міцність термоактивованих відходів є етрингіт  $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{CaSO}_4\cdot 32\text{H}_2\text{O}$ . Встановлено, що на ранніх стадіях гідrataції термоактивованих відходів переважає гідроалюмінатний тип тверднення з утворенням конверсійно стабільних гексагональних  $\text{AF}_m$ - фаз. В подальшому утворюються гідросилікати кальцію, які ущільнюють структуру, сприяючи збільшенню міцності в'язучого на основі регульованих термоактивованих відходів.

5. Встановлено, що регульовані термоактивовані відходи можуть використовуватись для укріплення ґрунтів різних типів, не поступаючись

властивостям ґрунтам, укріпленням портландцементом. Так, залежно від типу ґрунту, при заміні 10 мас% портландцементу на 14 мас.% регульованих термоактивованих відходів забезпечується розвиток процесів направленої структуроутворення в системі «ґрунт – регульовані термоактивовані відходи – вода», завдяки чому досягається необхідний рівень показників міцності та морозостійкості з отриманням марок укріпленого ґрунту М10, М20, М40. При цьому спостерігається зменшення набухання ґрунтів та збільшення їх несучої здатності, що підтверджується значеннями коефіцієнта CBR.

6. На основі комплексу фізико-механічних та фізико-хімічних досліджень встановлено, що регульовані термоактивовані відходи в композиційній системі «доменний гранульований шлак - регульовані термоактивовані відходи» забезпечують активізацію її шлакової складової та синергічний ефект, що проявляється при їх сумісній гідратації.

7. Підтверджено, що регульовані термоактивовані відходи в композиційній системі «доменний гранульований шлак - регульовані термоактивовані відходи» відіграють роль додаткового цементуючого матеріалу. Заміна 5 % мас. портландцементу на регульовані термоактивовані відходи зменшує частку найбільш енергоємної клінкерної складової цементу, що відповідає сучасним тенденціям економії паливно-енергетичних ресурсів із широким залученням у виробництво відходів промисловості

8. Запроектовано склад дорожньої цементобетонної суміші на основі розроблених композиційних систем з вмістом РТАВ. Методом математичного планування експерименту визначено оптимальний вміст регульованих термоактивованих відходів та суперпластифікатора Stachement 2570 у його складі. Аналіз поверхонь функцій відгуку свідчить, що 5 мас. % РТАВ та 0,8 мас.% суперпластифікатора забезпечують клас бетону за міцністю на стиск С40/50 та найвищу міцність бетону на розтяг при згині, що відповідає класу  $B_{тб} 6,4$ .

9. Розроблено та досліджено властивості дорожніх бетонів номінального складу 1:1,9:3,8 з вмістом 0,8 мас.% суперпластифікатора, 0,2 мас.% повітровтягувальної добавки Microporan. Встановлено, що у зразках з

оптимальним вмістом РТАВ досягається міцність на розтяг при згині у пізні терміни тужавіння  $R_{tb}=10,1$  МПа, показники водопоглинання, глибини проникнення води та відкритої пористості знижуються на 5-15% порівняно з контрольним складом без добавки РТАВ. Встановлено позитивний ефект від додавання 5-10 мас.% РТАВ на тріщиностійкість бетону як в докритичній ( $G_i=225-230$  Дж/м<sup>2</sup>), так і закритичній ( $G_f=650-607$  Дж/м<sup>2</sup>) стадіях руйнування, а також високі значення коефіцієнта інтенсивності напружень ( $K_i=0,96-0,98$  МПа·м<sup>1/2</sup>). Визначено, що бетони з оптимальним вмістом РТАВ характеризуються маркою за морозостійкістю F300, показниками водонепроникності WPD= 84 мм та стираності  $G=0,26$  г/см<sup>2</sup>.

10. Результати дослідно-промислового впровадження вказують на ефективність використання розроблених композиційних систем для укріплення шару основи та будівництва цементобетонних покриттів. Очікуваний економічний ефект від впровадження розроблених бетонів з вмістом РТАВ складає 94,01 тис.грн. при спорудженні 1 км покриття товщиною 28 см на дорозі II категорії.



## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бондар О. І., Байрак О.М. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2015 році. Міністерство екології та природних ресурсів України. Київ, 2017. 308 с.
2. Мазепа Ю.В., Семінський О.О., Рябцев Г.Л., Екобезпечні способи перероблення вологого осаду стічних вод целюлозно-паперового виробництва. Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2017. №172(1). С. 55-59.
3. Monte M.C., Fuente E, Blanco A., Negro C. Waste management from pulp and paper Production in the European Union // Waste Manage. 2009. 29(1), 293-308.
4. Bajpai P. Management of Pulp and Paper Mill Waste // Springer Int. Publ. 2015. 193 p.
5. Karthikeyan, K., Balasubramanian, S. Studies on the characterization and possibilities of reutilization of solid wastes from a waste paper based paper industry // Global Journal of Environmental Research 4.1. 2010. 18-22.
6. ТУ У 37.2-0212681-081:2004 Скоп волокнистий макулатурний. Технічні умови.
7. Рунова Р.Ф., Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л., Носовський Ю.Л. В'яжучі речовини. К.:Основа, 2012. 448с.
8. Шепелюк, І. Р., Шепелюк, О. О., Салдан, Р. Й., Лютий, П. В. Напрями використання скопу целюлозно-паперового виробництва. Науковий вісник НЛТУ України, 2014. 24(9). 171-174.
9. Ma, W., Qian, G., Zhang, S., & Wang, D.. Utilization of waste paper sludge in gypsum board. Journal of Cleaner Production. 2016. 112. 1318-1325.
10. Патент України, UA 143002 u, МПК С 04В 7/34 (2006.01). Сировинна суміш для виготовлення мінерального гідравлічного в'яжучого/ Свідерський В.А., Варшавець П.Г.; Черняк Л.П., Дорогань Н.О.(UA); - u 2019 11897 Заявл. 13.12.2019; Опубл. 10.07.2020. Бюл. №13.- 2 с.

11. Xie, F., Liu, S., Jiang, Z., & Zhang, S. Production and utilization of paper sludge ash: A review. *Journal of Cleaner Production*. 2019. 210. 1353-1370.
12. Di Fraia, S., & Uddin, M. R. Energy Recovery from Waste Paper and Deinking Sludge to Support the Demand of the Paper Industry: A Numerical Analysis. *Sustainability*. 2022. 14(8). 4669.
13. Lou, R., Wu, S., Lv, G., & Yang, Q.. Energy and resource utilization of deinking sludge pyrolysis. *Applied Energy*. 2012. 90(1). 46-50.
14. Патент України. UA 134174 u, МПК F23G/00, 5/02 (2006.01). Спосіб підготовки макулатурного скопу до термічної утилізації/ Белов С.В., Крупчак В.В. (UA); - u 2018 10787; Заявл. 01.11.2018; Опубл. 10.05.2019. Бюл. №9.- 9 с.
15. Патент України. UA 134182 u, МПК B0176/00, B 8/24 (2006.01), C04B 7/12 (2006.01), F23 G 5/12 (2006.01). Твердопаливний генератор тепла/ Белов С.В. (UA), Крупчак В.В. (СУ); - u 2018 11056 Заявл. 09.11.2018; Опубл. 10.05.2019; Опубл. 10.05.2019. Бюл. №9.- 11 с.
16. Liu, M., Tan, S., Zhang, M., He, G., Chen, Z., Fu, Z., & Luan, C. Waste paper recycling decision system based on material flow analysis and life cycle assessment: A case study of waste paper recycling from China. *Journal of environmental management*. 2020. 255. 109859.
17. Zhao, Y., Liu, Z., Chen, Y., Gao, Y., & Wu, Q. Effect of incineration temperature on the chemical properties of paper sludge ash. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. 9(4). 8569-8581.
18. Kubba, H. Z., Nasr, M. S., Al-Abdaly, N. M., Dhahir, M. K., & Najim, W. N.. Influence of incinerated and non-incinerated waste paper on properties of cement mortar. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020, January. Vol. 671, No. 1, p. 012113
19. bin Mohd Sani, M. S. H., bt Muftah, F., & Ab Rahman, M. Properties of Waste Paper Sludge Ash (WPSA) as cement replacement in mortar to support green technology material. In *2011 3rd International Symposium & Exhibition in Sustainable Energy & Environment (ISESEE)*. 2011, June. 94-99.

20. Zhu, C., Zhang, Y., Gu, J., & Wu, H.. Effects of paper sludge ash as a partial replacement of fly ash on the properties of fiber cement board. *Construction and Building Materials*. 2019. 222. 208-215.
21. Hidei, V., Sidun, I., Hunyak, O., Stanchak, S., Bidos, V. Application of wastepaper sludge ash as mineral powder for hot asphalt concrete mix. *Theory and Building Practice*. 2020. 42-47.
22. Sidun I., Vollis O., Hidei V., Bidos V. Quick-traffic slurry surfacing mix with orthophosphoric acid // *Production Engineering Archives*. 2021. Vol. 27, iss. 3. P. 191–195.
23. Abdalla, A., Faheem, A. F., Walters, E. Life cycle assessment of eco-friendly asphalt pavement involving multi-recycled materials: A comparative study. *Journal of Cleaner Production*. 2022. 362. 132471.
24. Shah, S. N., Mo, K. H., Yap, S. P., Yang, J., Ling, T. C. Lightweight foamed concrete as a promising avenue for incorporating waste materials: A review. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021. 164. 105103.
25. Frias M., Garcia R., Vigil R., Ferreiro S. Calcinations of art paper sludge waste for the use as a supplementary cementing material. *Appl Clay Sci* 2001. 42(1-2) 189-193.
26. Каськів, В. І., Півторацький, Д. С., Дубова, О. А. Дослідження ефективності використання стабілізаторів для укріплення ґрунтів. *Збірник наукових праць «Дороги і мости»*. 2022. 26. 147-154.
27. Мозговий, В. В., Онищенко, А. М., Гаркуша, М. В., Аксьонов, С. Ю. Сучасні аспекти підвищення колієстійкості нежорсткого дорожнього одягу. *Автошляховик України*. 2012. 5. 25-30.
28. Гамеляк, І. П., Даценко, В. М. Забезпечення надійності конструкції дорожнього одягу за несною здатністю при капітальному ремонті та реконструкції. *Автошляховик України*. 2015. 5. 40-43.
29. Thom, N. *Principles of Pavement Engineering (Second edition)*. ICE Publishing. ISBN 978-0-7277-5853-8. 2003.
30. Гаркуша, М. В. Підвищення колієстійкості нежорстких дорожніх

одягів за рахунок укріплення ґрунтів основи. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. 47. 47-53.

31. Petry, T. M., Little, D. N. Review of stabilization of clays and expansive soils in pavements and lightly loaded structures—history, practice, and future. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2002. 14(6), 447-460. doi: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2002\)14:6\(447\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2002)14:6(447))

32. Halsted, G. E., Adaska, W. S., McConnell, W. T. (2008). Guide to cement-modified soil (CMS). Available at: <http://secement.org/wp-content/uploads/2017/04/EB242.pdf>

33. Лапченко, А. С. Прогнозування морозостійкості цементоґрунтів за показником їх пористості. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2017. 69. 87-92.

34. Онищенко, А. М., Гаркуша, М. В. Методи стабілізації та укріплення ґрунту. *Дороги і мости*. 2010. 12. 145-149.

35. Маліков, В. В., Панасюк, Я. І., Боярчук, Б. А. Практичний досвід застосування цементоґрунтів для будівництва дорожніх покриттів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. 11. 62-72.

36. Жданюк, В. К., Лапченко, А. С., Панасюк, Я. І. Властивості комплексно укріпленого ґрунту для будівництва конструктивних шарів дорожніх одягів автомобільних доріг. *Наукові нотатки*. 2012. 37. 101-104.

37. Archibong, G. A., Sunday, E. U., Akudike, J. C., Okeke, O. C., Amadi, C. A review of the principles and methods of soil stabilization. *International Journal of Advanced Academic Research| Sciences*. 2020. 6(3). 2488-9849.

38. Das, B. M. Chemical and mechanical stabilization. *Transportation Research Board*. 2003.

39. Bell, F. G. Lime stabilization of clay minerals and soils. *Engineering geology*. 1996. 42(4). 223-237.

40. Prusinski, J., Bhattacharja, S. Effectiveness of Portland cement and lime in stabilizing clay soils. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. 1999. 1652. 215-227.

41. Солодкий, С. Й., Топилко, Н. І., Турба, Ю. В., Гримак, О. Я., Новицький, Ю. Л. Оптимізація складу цементогрунту з метою підвищення його фізико-механічних показників. Вісник національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. 2018. 877. 199-211.
42. Melese, E., Vaaj, H., Tighe, S., Zupko, S., Smith, T. Characterisation of full-depth reclaimed pavement materials treated with hydraulic road binders. *Construction and Building Materials*. 2019. 226. 778-792. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.317>
43. Saussaye, L., Boutouil, M., Baraud, F., Leleyter, L., Abdo, J. Influence of chloride and sulfate ions on the geotechnical properties of soils treated with hydraulic binders. *Road Materials and Pavement Design*. 2013. 14(3). 551-569. Doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.779303>
44. Маліков, В. В., Панасюк, Я. І., Ящук, Ю. Ф. Укріплення ґрунту цементом та добавкою Hydrostop. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017. 8. 159-163.
45. Жданюк, В. К., Панасюк, Я. І. Дослідження впливу водних катіонних латексів серії Butonal на міцність цементогрунту. Містобудування та територіальне планування. 2011. 40 (1). 407-411.
46. Климчук, В.Т., Прищепа, О. А., Совецький, В. Л. Використання полімерної добавки «Nanoterrasoil» виробництва Німеччини для стабілізації ґрунтів військово-автомобільних (польових, лісових) доріг та площадок. Військово-технічний збірник. 2019. 21. 17-23.
47. Chen, L., and Lin, D. F. Stabilization treatment of soft subgrade soil by sewage sludge ash and cement. *J. Hazard. Mater.* 2009. 162(1). 321–327.
48. Jonathan, Q. A., Sanders, T. G., Chenard, M. Road dust suppression effect on unpaved road stabilization. *JEST, Malaysia*. 2004. 1. 21.
49. Yin, C. Y., Mahmud, H. B., and Shaaban, G. Stabilization/ solidification of lead-contaminated soil using cement and rice husk ash. *J. Hazard. Mater.* 2006. B137(3). 1758–1764.
50. Маліков, В. В., Панасюк, Я. І. Про можливість використання ґрунтів

укріплених цементом із додаванням добавок Perma-Zyme 11X, SoilGrip ES-10, RoadСem для будівництва шарів дорожніх одягів. Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві. 2017. 7. 126-132.

51. Новицький, О. П. Методи закріплення ґрунтів цементом. Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. 2013. (3), 32-37.

52. Takhelmayum, G., Savitha, A. L., Krishna, G. Laboratory study on soil stabilization using fly ash mixtures. International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT). 2013. 2(1). 477-482.

53. Sarkkinen, M., Kujala, K., Kemppainen, K., Gehör, S. Effect of biomass fly ashes as road stabilisation binder. Road Materials and Pavement Design. 2018. 19(1). 239-251.

54. Yarbaçi, N., Kalkan, E., and Akbulut, S. Modification of the geotechnical properties, as influenced by freeze-thaw, of granular soils with waste additives. Cold Reg. Sci. Technol. 2007. 48(1). 44–54.

55. Gobinath, R., Ganapathy, G. P., Akinwumi, I. I., Kovendiran, S., Hema, S., Thangaraj, M. Plasticity, strength, permeability and compressibility characteristics of black cotton soil stabilized with precipitated silica. Journal of Central South University. 2016. 23. 2688-2694.

56. Fattah, M. Y., Rahil, F. H., Al-Soudany, K. Y. Improvement of clayey soil characteristics using rice husk ash. Journal of Civil Engineering and Urbanism. 2013. 3(1). 12-18.

57. Schöler, A., Lothenbach, B., Winnefeld, F., Zajac, M. Hydration of quaternary Portland cement blends containing blast-furnace slag, siliceous fly ash and limestone powder. Cement and Concrete Composites. 2015. 55. 374-382.

58. ДСТУ EN 13282-1:2021 В'язучі дорожні гідравлічні. Частина 1. В'язучі дорожні гідравлічні швидкого тверднення. Склад, технічні умови та критерії відповідності (EN 13282-1:2013, IDT)

59. Buczyński, P., Lech, M. The impact of one-, two-and three-component hydraulic road binder on the properties of the hydraulically bound mixture. Procedia Engineering. 2015. 108. 116-123.

60. Adaska, W. S., Luhr, D. R. Control of reflective cracking in cement stabilized pavements. In Proceedings of 5th International RILEM Conference on Cracking in Pavements. 2004. (pp. 309-316).
61. Abdo, J., Serfass, J. P., Pellevoisin, P. Pavement cold in-place recycling with hydraulic binders: The state of the art in France. Road Materials and Pavement Design. 2013. 14(3). 638-665. Doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2013.817350>
62. Rahmat, M. N., Kinuthia, J. M. Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction. Engineering Geology. 2011. 117(3-4). 170-179.
63. Rahmat, M. N., Ismail, N. Sustainable stabilisation of the Lower Oxford Clay by non-traditional binder. Applied Clay Science. 2011. 52(3). 199-208.
64. Mavroulidou, M. Use of waste paper sludge ash as a calcium-based stabiliser for clay soils. Waste Management & Research. 2018. 36(11). 1066-1072.
65. Mavroulidou, M., Gray, C., Gunn, M. J., Pantoja-Muñoz, L. (2021). A study of innovative alkali-activated binders for soil stabilisation in the context of engineering sustainability and circular economy. Circular Economy and Sustainability. 2021. 1-25.
66. Segui, P., Aubert, J. E., Husson, B., Measson, M. Characterization of wastepaper sludge ash for its valorization as a component of hydraulic binders. Applied Clay Science. 2012. 57, 79-85.
67. Segui, P., Aubert, J. E., Husson, B., Measson, M. Valorization of wastepaper sludge ash as main component of hydraulic road binder. Waste and Biomass Valorization. 2013. 4, 297-307.
68. Саницький, М. А., Кропивницька, Т. П., Іващин, Г. С., Русин, Б. Г. Концепція низьковуглецевого розвитку в цементній промисловості. Строительные материалы и изделия. 2017. (5-6), 24-27.
69. Круць, Т. М., Гевюк, І. М., Саницький, М. А., Кропивницька, Т. П. Принципи стратегії сталого розвитку в цементній промисловості. Строительные материалы и изделия. 2015. (3-4), 16-19.
70. Ishimoto, H., Origuchi, T., Yasuda, M. Use of papermaking sludge as new

material. *J Mater Civ Eng*, 2000. 12(1):310–313.

71. Doudart de la Grée, G.C.H., Yu, Q.L., Brouwers, H.J.H. Upgrading and evaluation of waste paper sludge ash in ecolightweight cement composites. *J Mater Civ Eng*. 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002186](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002186)

72. Fava, G., Ruello, M.L., Corinaldesi, V. Paper mill sludge ash as supplementary cementitious material. *J Mater Civ Eng*, 2011. 23:772–776.

73. Doudart de la Grée, G.C.H. Physical-chemical upgrading and use of bio energy fly ashes as building material in the concrete industry. MSc Dissertation, Eindhoven Univ. of Technology, Netherlands. 2012.

74. Dunster A.M. Characterisation of Mineral Wastes, Resources and Processing technologies—integrated waste management for the production of construction material Case Study: Paper sludge and paper sludge ash in Portland cement manufacture. 2007. Report WRT 177/WR0115, DEFRA.

75. Saranya, S., Shanmygalakshmi, Arun Raja L. Experimental investigation on self compacting concrete by partial replacement of waste paper sludge ash with cement. *SSRJ Int J Civ Eng*, Special Issue April 2017. 519–523.

76. Lenin, S.M., Jeeva, D., Vadivel, M. Flexural behavior of concrete using waste paper sludge ash. *Int J Earth Sci Eng*. 2016. 9(3):497–500.

77. Wu, H., Huang, B., Shu, X., Yin, J. Utilization of solid wastes/ byproducts from paper mills in Controlled Low Strength Material (CLSM). *Constr Build Mater*. 2016 118:155–163.

78. Fauzi, M.A., Arshad, M.F., Nor, N.M. Statistical models to develop optimised controlled low-strength materials with wastepaper sludge ash. *Constr Build Mater*, 2021. 186:122816.

79. Mozafari, E., O’Farrell, M., Kinuthia, J.M., Wild, S. Improving strength development of wastepaper sludge ash by wet-milling. *Cem Concr Compos*. 2006, 28:144–152.

80. Mozafari, E., Kinuthia, J.M., Wild, J., Bai, S. An investigation into the strength development of wastepaper sludge ash blended with ground granulated blastfurnace slag. 2009. *Cem Concr Res* 39:942–949.



81. Kumar, A., Rani, D. Performance of concrete using paper sludge ash and foundry sand. *Int J Innov Res Sci Eng Technol*. 2016. 5(9):171–176
82. Mavroulidou, M., Awoliyi, S. A study on low energy demand materials used in glasscrete to counteract alkali-silica reactions, 15th International Conference on Environmental Science and Technology CEST2017, Rhodes, Greece, 31 August to 2 September 2017.
83. Mavroulidou, M., Awoliyi, S. A study on the potential use of paper sludge ash in concrete with glass aggregate. *Waste Manag Res*. 2018. 36(11):1061–1065.
84. Fauzi, M.A., Sulaiman, H., Ridzuan, A.R.M., Azmi, A.N. The effect of recycled aggregate concrete incorporating waste paper sludge ash as partial replacement of cement. 2016. *AIP Conf Proc* 1774:030007.
85. Wong, H.S., Barakat, R., Alhilali, A., Saleh, M., Cheeseman, C.R. Hydrophobic concrete using waste paper sludge ash. *Cem Concr Res*. 2015. 70:9–20.
86. Pera, J., Amrouz, A. Development of highly reactive metakaolin from paper sludge. *Advanced Cement Based Materials*. 1998. 7(2), 49-56.
87. Frías, M., Vegas, I., de la Villa, R. V., & Giménez, R. G. Recycling of waste paper sludge in cements: characterization and behavior of new eco-efficient matrices. *Integr Waste Manage*. 2011. 2, 11301.
88. Frías, M., Rodríguez, O., & De Rojas, M. S. Paper sludge, an environmentally sound alternative source of MK-based cementitious materials. A review. *Construction and Building Materials*. 2015. 74, 37-48.
89. Banfill, P., & Frias, M. Rheology and conduction calorimetry of cement modified with calcined paper sludge. *Cement and concrete research*. 2007. 37(2), 184-190.
90. Bikila Meko, Joshua Ighalo, Pengcheng Jiao (Reviewing editor) Utilization of waste paper ash as supplementary cementitious material in C-25 concrete: Evaluation of fresh and hardened properties, *Cogent Engineering*. 2021 8:1, DOI: 10.1080/23311916.2021.1938366.
91. O'Farrell, M., Chaipanich, A., Kinuthia, J. M., Sabir, B. B., & Wild, S. A new concrete incorporating wastepaper sludge ash (WSA). *Innovations and*

developments in concrete materials and construction. 2002. 149-158.

92. Solahuddin, B. A., & Yahaya, F. M. A Review Paper on The Effect of Waste Paper on Mechanical Properties of Concrete. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021. (Vol. 1092, No. 1, p. 012067). IOP Publishing.

93. Ahmad, S., Malik, M. I., Wani, M. B., & Ahmad, R. Study of concrete involving use of waste paper sludge ash as partial replacement of cement. IOSR Journal of Engineering. 2013. 3(11), 06-15.

94. Kejela, B. M. Waste paper ash as partial replacement of cement in concrete. American Journal of Construction and Building Materials. 2020. 4(1), 8-13.

95. Elbasri, O. M., Nser, S., Shubaili, M., Abdullah, G. M., Zeyad, A. M. (2022). Performance of self-compacting concrete incorporating wastepaper sludge ash and pulverized fuel ash as partial substitutes. Case Studies in Construction Materials, 17, e01459.

96. Толмачев, С. Н., Беличенко, Е. А. Повышение качества цементных композитов за счет введения дисперсных материалов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2016. (61), 392-397.

97. Беличенко, Е. А., Толмачев, С. Н. Микронаполнители как структурообразующий компонент высокофункциональных бетонов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014. (53), 41-48.

98. Саницький, М. А., Марущак, У. Д., Чемерис, М. М., & Шийко, О. Я. Модифіковані швидкотверднучі портланд-цементи для прогресивних дорожньо-будівельних технологій. Дороги і мости. 2006. (6), 278-288.

99. Sanytsky, M., Kropyvnytska, T., Fic, S., & Ivashchyshyn, H. Sustainable low-carbon binders and concretes. In E3S Web of Conferences. 2020. (Vol. 166, p. 06007). EDP Sciences.

100. Дворкин, Л., Дворкин, О. Специальные бетоны. Litres. 2014.

101. Собко, Ю. М., Шевчук, Г. Я., Топилко, Н. І., Новицький, Ю. Л. Дорожні цементобетони на основі модифікованих добавок нової генерації. Вісник Національного університету "Львівська політехніка". Серія: Теорія і практика будівництва. 2018. (888), 133-137.

102. Толмачев, С. Н., Солодкий, С. Й. Факторы обеспечения долговечности дорожного цементного бетона. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2013. (52), 275-280.
103. Метакаолін в будівельних розчинах і бетонах/ Л.Й. Дворкін, Н.В. Лушнікова, Р.Ф. Рунова, В.В Троян. – К: КНУБіА, 2007.-216 с.
104. Пащенко О.О., Сербін В.П., Старчевська О.О. В'язучі матеріали. – К.: Вища школа, 1995.-416 с.
105. Теорія цементу/ Под ред. А.А. Пащенко.-К.: Будівельник, 1991.-168с.
106. Тейлор Х . Хімія цементу. М.: Мир, 1996.-506 с
107. Саницький М.А., Соболев Х.С., Марків Т.Є. Модифіковані -композиційні цементу. Львів: ЛП, 2010.-132с.
108. Думич І.Ю., Топилко Н.І. Грунтознавство та механіка ґрунтів. – Львів: ЛП, 2014. – 189 с.
109. Дворкін, Л. Й., Дворкін, О. Л., Житковський, В. В. (2011). Розв'язування будівельно-технологічних задач методами математичного планування експерименту. Посібник.
110. Сопов, В. П., Толмачев, Д. С. Влияние минеральных и воздухововлекающих добавок на усадку и свойства дорожных бетонов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014. (53), 363-368.
111. Солодкий С. Тріщиностійкість бетонів на модифікованих цементах: Монографія. - Львів: Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» - 2008. – 144 с.
112. Солодкий С. Й., Гуняк О. М., Марків Т. Є. Тріщиностійкість модифікованих високоміцних дорожніх бетонів. Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. 2016. (98), 247–255.
113. Hunyak O., Markiv T., Sobol K. Effect of mineral additives on structure and properties of concretes for pavements // XVI. International Scientific Conference Košice-Lviv-Rzeszów —Current Issues of Civil and Environmental Engineering Košice-Lviv-Rzeszów. Book of abstracts. Kosice, 2017. – P. 21.

# ДОДАТКИ

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації у наукових періодичних виданнях інших держав та виданнях

*України, які включено до міжнародних наукометричних баз:*

1. Sobol K., Solodkyu S., Petrovska N., Belov S., Hunyak O. & Hidei V. (2020). Chemical Composition and Hydraulic Properties of Incinerated Wastepaper Sludge. *Chemistry & Chemical Technology*. 14. 538-544.
2. Oleksii Hunyak, Volodymyr Hidei, Khrystyna Sobol, Nadiya Petrovska Valorization of Wastepaper Sludge Ash as Supplementary Cementitious Material in Concrete. *Proceedings of EcoComfort 2022* (pp.94-100).
3. Sidun, Iurii, Vollis, Oleksiy, Hidei, Volodymyr and Bidos, Volodymyr. "Quick-traffic slurry surfacing mix with orthophosphoric acid" *Production Engineering Archives*, vol.27, no.3, 2021, pp.191-195. <https://doi.org/10.30657/pea.2021.27.252>.

*Статті у наукових фахових виданнях України:*

4. Аналіз ефективності використання тонкомеленого доменного гранульованого шлаку в бетоні / Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, Н. І. Петровська, В. В. Гідей // Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. Серія: Теорія і практика будівництва. — Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2019. — № 912. — С. 169–174.
5. Hidei, Volodymyr & Sidun, Iurii & Hunyak, Oleksii & Stanchak, Svitlana & Bidos, Volodymyr. (2020). Application of wastepaper sludge ash as mineral powder for hot asphalt concrete mix. *Theory and Building Practice*. 2020. 42-47. [10.23939/jtbp2020.02.042](https://doi.org/10.23939/jtbp2020.02.042).
6. Serhiy Solodkyu, Volodymyr Hidei, Iurii Sidun, and Yuriy Turba (2021) Using waste paper sludge ash (wsa) as a material for soil strengthening for the construction of layers of roadwear *JTBP* Volume 3, Number 1: 85-91 <https://doi.org/10.23939/jtbp2021.01.085>.

«ЗАТВЕРДЖУЮ»  
Генеральний директор ТзОВ «Балтом Україна»



Михайло КОЗАК

### А К Т

про впровадження у виробництво ділянки під'їзних доріг на об'єкті: «Нове будівництво ЦПС 35/110 кВ «Яворівська ВЕС/СЕС» на території Яворівського району Львівської області» з укріпленими в результаті стабілізації ґрунту регульованими термоактивованими відходами паперового виробництва

Ми, нижче підписані, представник ТзОВ «Балтом Україна» генеральний директор Михайло КОЗАК, та представники Національного університету «Львівська політехніка» д.т.н., професор Христина СОБОЛЬ, аспірант Володимир ГІДЕЙ, склали даний акт про те, що у грудні 2020 року проведено роботи з улаштування ділянки під'їзних доріг з укріпленими в результаті стабілізації ґрунту регульованими термоактивованими відходами паперового виробництва на об'єкті **«Нове будівництво ЦПС 35/110 кВ «Яворівська ВЕС/СЕС» на території Яворівського району Львівської області».**

Загальний обсяг вкладеного укріпленого ґрунту склав 250 м<sup>3</sup>.

Завдяки використанню регульованих термоактивованих відходів при укріпленні ґрунтів вирішено технологічні завдання із забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик укріпленого шару.

Застосування регульованих термоактивованих відходів забезпечило прискорений набір ранньої міцності, що дозволило пришвидшити влаштування верхніх шарів дорожнього одягу.

Акт підписали:

Представник ТзОВ «Балтом Україна»

Генеральний директор

Михайло КОЗАК

Представники Національного університету «Львівська політехніка»

Професор, д.т.н.

Христина СОБОЛЬ

Аспірант

Володимир ГІДЕЙ



### Випробування цементобетонів з використанням регульованих термоактивованих відходів

Згідно листа №02 від 27.02.2023 року від кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка», ПП «Лабораторія ЗахідДорСервіс» на добровільних засадах провела формування та випробування цементобетонів з використанням регульованих термоактивованих відходів (РТАВ), які були надані аспірантом кафедри автомобільних доріг та мостів Національного університету «Львівська політехніка» Гідейом Володимиром Володимировичем в рамках виконання його дисертаційної роботи. Склад цементобетону наведений в табл. 1, а фізико-механічні властивості в табл.2.

Таблиця 1

Склад та властивості бетонних сумішей

№	Витрата компонентів		Жорсткість, с	В/Т	Середня густина суміші, кг/м <sup>3</sup>
	ПЦ П / А-Ш-500Р-Н, кг/м <sup>3</sup>	РТАВ, кг/м <sup>3</sup>			
1	350	-	5	0,42	2364
2	332,5	17,5	7	0,42	2398
3	315	35	9	0,42	2312

Вміст заповнювачів для всіх складів бетонних сумішей становив 670 і 1315 кг/м<sup>3</sup> піску та щебеню відповідно. Також до складу бетону вводили суперпластифікатор та повітровтягувальну добавку.

Таблиця 2

Фізико-механічні властивості дорожніх цементобетонів

№	Міцність на стиск, МПа, у віці, діб			Міцність бетону на розтяг при згині, МПа, у віці, діб	
	3	7	28	3	28
1	39,3	46,1	64,5	6,2	8,6
2	39,5	45,1	63,7	6,5	8,7
3	36,5	41,0	61,1	5,4	7,6

Аналізуючи табл.2 «Фізико-механічні властивості дорожніх цементобетонів», міцність бетонів з добавкою РТАВ вказує на доцільність їх використання у дорожньому будівництві. Незважаючи на дещо нижчі показники міцності на стиск у віці 28 діб, найвищою міцністю на розтяг при згині характеризуються склади з вмістом 5 мас.% РТАВ.

Інженер лаборант  
Технік

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

Пирик Р.В.  
Шіц І.І.

## ЗАТВЕРДЖУЮ



Проректор з науково-педагогічної  
роботи та інформатизації

Національного університету  
«Львівська політехніка»

Павло ЖЕЖНИЧ

2023р.

## АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи аспіранта  
кафедри автомобільних доріг і мостів Гідея Володимира Володимировича  
на тему: «Композиційні системи з використанням термоактивованих  
відходів паперового виробництва для дорожнього будівництва»**

Нами, головою науково-методичної комісії спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія, к.т.н., доцентом Холодом П.Ф., завідувачем кафедри автомобільних доріг і мостів, д.т.н., професором Соболю Х.С. складено даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Гідея В.В. впроваджені в навчальний процес на кафедрі автомобільних доріг і мостів, зокрема, в дисциплінах «Виробничі підприємства та дорожньо-будівельні матеріали» для 1-го освітнього рівня «бакалавр» та «Сучасні технології і матеріали в дорожньому будівництві» для 2-го освітнього рівня «магістр» за освітньою програмою «Автомобільні дороги та аеродроми», що викладається для студентів спеціальності 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Результати дисертаційної роботи використовуються при виконанні магістерських кваліфікаційних робіт за спеціальністю 192 Будівництво та цивільна інженерія.

Голова науково-методичної комісії  
спеціальності 192 Будівництво та  
цивільна інженерія, к.т.н., доцент

Петро ХОЛОД

Завідувач кафедри «Автомобільні дороги  
та мости», д.т.н. професор

Христина СОБОЛЬ