



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**ПІВНІЧНО-СХІДНИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР  
ТРАНСПОРТНОЇ АКАДЕМІЇ УКРАЇНИ**

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ  
УКРАЇНСЬКОГО ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

*Випуск 206*

**Харків 2023**

## **УДК 656.2(062)**

У Збірнику наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту публікуються результати наукових досліджень, наукові та конструкторські розробки та інші матеріали вчених, фахівців залізничного транспорту і промислових підприємств, спрямовані на вирішення сучасних завдань і проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, теплоенергетики та матеріалознавства, автоматики, телемеханіки та зв'язку тощо.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, здобувачів вищої освіти і науковців залізничного транспорту та інших галузей промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: <https://bit.ly/3vVHlv3>.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до міжнародної наукометричної бази Index Copernicus (Польща).

З реєстрацією збірника можна ознайомитися на сайті <http://jml2012.indexcopernicus.com>.

**Google Scholar профіль:** <https://scholar.google.com.ua>

**Веб-сторінка збірника:** <https://kart.edu.ua/unit/zbirnik-ukrsurt>

### **Реферативна база**

**«Наукова періодика України»:** <http://csw.kart.edu.ua>

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПП від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 6 від 11 грудня 2023 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

**Редакційна колегія**

Головний редактор – Вовк Руслан Володимирович, доктор фізико-математичних наук, професор, УкрДУЗТ

Випусковий редактор – Кравець Андрій Михайлович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

**Залізничний транспорт (273)**

Пузир В. Г., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фомін О. В., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Путято А. В., д.т.н., доцент (ГДТУ ім. П. О. Сухого, Республіка Білорусь)  
Горобченко О. М., д.т.н., доцент (ДУІТ, м. Київ)  
Дацун Ю. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мартинів І. Е., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Vureika G., dsc, professor (VGTU, Литва)  
Михалків С. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ловська А. О., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)

**Будівництво та цивільна інженерія (192)**

Бліхарський З. Я., д.т.н., професор  
(НУ Львівська політехніка)  
Борзяк О. С., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ватуля Г. Л., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Лобяк О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Орел Є. Ф., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Плугін А. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Плугін Д. А., д.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Пушкарьова К. К., д.т.н., професор (КНУБА)  
Толмачов С. М., д.т.н., професор (ХНАДУ)  
Трикоз Л. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шабанова Г. М., д.т.н., професор (НТУ ХП)  
Шмуклер В. С., д.т.н., професор (ХНУМГ)  
Fisher Hans-Bertram., dr. ind., professor (Bauhaus-Universität Weimar F.A., Німеччина)  
Опанасенко О. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Механічна інженерія (131, 132, 133)**

Астанін В. В., д.т.н., професор (НАУ м. Київ)  
Воронін С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Геворкян Е. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Ковальова І. М., к.т.н., доцент (НАНБ, Білорусь)  
Онопрейчук Д. В., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Стефанов В. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Тимофеев С. С., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Тимофеева Л. А., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Федориненко Д. Ю., д.т.н., професор (Tohoku University, Японія)

**Транспортні технології (275)**

Панченко С. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Бутько Т. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Прохорченко А. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Шраменко Н. Ю. д.т.н., професор (ДБТУ)  
Мороз М. М. д.т.н., професор (КНУ, м. Кременчук)  
Кириллова О. В., д.т.н., доцент (ОНМУ, м. Одеса)  
Бабаєв М. М., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Лаврухін О. В., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Потапов Д. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Ходаківський О. М., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)

**Геодезія та землеустрій (193)**

Eimuntas Paršeliūnas, Prof. Habil Dr. (VGTU, Литва)  
Jūrate Sužiedelytė Visockienė, Assoc. Prof. Dr.  
(VGTU, Литва)  
Угненко Є. Б., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Маланчук М. С., д.т.н., доцент (НУ «Львівська  
політехніка»)  
Церклевич А. Л., д.т.н., доцент (НУ «Львівська  
політехніка»)  
Viselga Gintas, Assoc. Prof. Dr. (VGTU, Литва)  
Мамонов К. А., д.е.н., професор (ХНУМГ)  
Савенко В. Я., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)

**Теплоенергетика (144)**

Каграманян А. О., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Мороз В. І., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Фалендиш А. П., д.т.н., професор (УкрДУЗТ)  
Грицук І. В., д.т.н., доцент (ХМДА, м. Херсон)  
Сотник М. І., д.т.н., доцент (СДУ, м. Суми)  
Дешко В. І., д.т.н., професор (НТУ, м. Київ)  
Бабіченко Ю. А., к.т.н., доцент (УкрДУЗТ)  
Pavlenko A., dsc. tech., profesor (KUT, Poland)  
Bartoszewicz J., dsc. tech., profesor (PUT, Poland)  
Tomaszewski F., phd, profesor (PUT, Poland)



## ЗМІСТ

### Механічна інженерія (131, 132, 133)

- Воронін С. В., Ремарчук М. П., Суранов О. О., Суранов О. В., Бабенко А. О.* Аналіз досліджень з отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах 7
- Зозуля Е. В., Колупаєв І. М.* Оксид алюмінію у вакуумних конденсатах на основі міді 24
- Зозуля Е. В., Зубков А. І., Терлецький О. С., Рябоштан В. А.* Ніобій у міді та сплавах на її основі. Огляд 31

### Теплоенергетика (144)

- Алексахін О. О., Панчук О. В., Счастний Є. Є., Василенко О. В.* Вибір параметрів скручених стрічок для інтенсифікації теплоперенесення в каналах системи охолодження енергетичного обладнання 44
- Тарадай О. М., Бугай В. С., Гвоздецький О. В., Дяченко С. В.* Досвід поетапного переобладнання загальнобудинкової вертикальної системи опалення в поквартирну горизонтальну 53

### Будівництво та цивільна інженерія (192)

- Костюк Т. О., Пługін А. А., Пługін Д. А., Макаренко О. В., Бондаренко О. І., Деденьова О. Б.* Вплив усадкових контактних напруг на міцність зчеплення гідроізоляційного складу і «старого» бетону 63
- Дорошенко О. Ю.* Вивчення властивостей дрібнозернистих цементобетонів із використанням пластифікаторів і базальтового волокна 72
- Пługін А. А., Муригіна Н. О., Малішевська А. С., Пługін Д. А., Муригін М. А.* Розроблення та дослідження композиційного матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна 82
- Костюк Т. О., Пługін А. А., Пługін Д. А., Бондаренко О. І., Деденьова О. Б.* Механізм створення цементного композита з підвищеними гідрофізичними і радіаційно-захисними властивостями 101
- Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М.* Опір стиснутого бетону дії тривалих навантажень 112
- Трикоз Л. В., Зінченко О. С., Никитинський А. В., Романенко О. В.* Оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону 121

### Геодезія та землеустрій (193)

- Шарий Г. І., Угненко Є. Б., Сорочук Н. І., Коростельов Є. М., Ужвієва О. М., Шевченко А. О.* Розвиток адміністративно-територіального устрою України як відповідь на мілітарні виклики 129

**Транспортні технології (275)**

- Ковальов А. О., Бауліна Г. С., Богомазова Г. Є., Керницький І. В., Мигалатій Є. А.* Удосконалення процесу перевезення вантажів маршрутами в напрямку західних кордонів України 139

**Залізничний транспорт (273)**

- Піценко І. В.* Застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів для зниження ризиків відмов 153

**МЕХАНІЧНА ІНЖЕНЕРІЯ (131, 132, 133)**

---

УДК 621.891

**АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ З ОТРИМАННЯ НАНОЧАСТИНОК ВУГЛЕЦЮ ТА ЇХНЬОГО ЗАСТОСУВАННЯ В ТРИБОЛОГІЧНИХ СИСТЕМАХ**

Доктори техн. наук С. В. Воронін, М. П. Ремарчук,  
кандидати техн. наук О. О. Суранов, О. В. Суранов, А. О. Бабенко

**ANALYSIS OF RESEARCH ON THE PRODUCTION OF CARBON NANOPARTICLES AND THEIR APPLICATION IN TRIBOLOGY SYSTEMS**

Dr. Sc. (Tech.) S. V. Voronin, Dr. Sc. (Tech.) M. P. Remarchuk, PhD (Tech.) O. O. Suranov,  
PhD (Tech.) O. V. Suranov, PhD (Tech.) A. O. Babenko

***Анотація.** У статті проведено аналіз досліджень отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах, методів і пристроїв для отримання, досліджень з вивчення впливу наночастинок вуглецю на мастильну плівку, надано розрахункову схему взаємодії наночастинок вуглецю з металевою поверхнею в парі тертя, розрахункову модель зміни часу адсорбції наночастинок вуглецю залежно від радіуса до початкової відстані.*

***Ключові слова:** наночастинок вуглецю, концентрація вуглецевої сажі, мастильна здатність, тертя, інтенсивність зношування.*

***Abstract.** The article analyzes research on the production of carbon nanoparticles and their use in tribological systems. A comparison of the results of installations based on different methods of obtaining nanotubes and fullerenes shows that the purest and highest-quality product is obtained by laser evaporation of graphite, but this is a long, time-consuming and expensive process. The yield of useful products is up to 20 %. The thermal method has its advantages and disadvantages. The advantages include the availability and cheapness of carbon raw materials: from oil, carbon gases to municipal waste. All of them are sources of nanotubes and fullerenes when using the thermal method. The yield of useful nanoproducts is average, and the purity reaches 90-95 %.*

*The simplest known method is the electric arc method for obtaining nanotubes and fullerenes. However, the yield of useful products does not exceed 15%. In addition, the large number of reactor designs for obtaining highly structured carbon nanoparticles indicates that an acceptable design has not yet been found that would guarantee obtaining a product with specified properties, stable parameters and in the required quantities.*

*The article also analyzes research on the effect of carbon nanoparticles on the lubricating film, provides a calculation scheme for the interaction of a carbon nanoparticle with a metal surface in a friction pair, and provides a calculation model for the change in the adsorption time of carbon nanoparticles depending on the radius to the initial distance. Which showed that according to the experimental data of other researchers, the data obtained regarding the time of physical adsorption of individual molecules and their aggregates is about  $10^{-9}$  to  $10^{-6}$  seconds, which confirms the priority of the formation of the solvate shell, and only then the manifestation of the adsorption of carbon nanoparticles.*

*The analysis of studies on the influence of carbon nanoparticles showed that there is a dependence for determining the intensity of wear of sliding friction pairs in elastic contact, which takes into account the concentration of carbon nanoparticles in the oil and the contact pressure. According to the obtained dependence, the intensity of wear is inversely proportional to the concentration of carbon nanoparticles, and directly proportional to the contact pressure.*

**Keywords:** carbon nanoparticles, carbon black concentration, lubricity, friction, wear intensity.

**Вступ.** Способи та пристрої виробництва для отримання наночастинок вуглецю (НЧВ), відомі на сьогодні, не дають змогу виробляти їх у достатній для досліджень і застосування кількості, крім того, НЧВ мають високу собівартість у виробництві. Тому розроблення нових способів і пристроїв є актуальним завданням.

Незважаючи на унікальні властивості НЧВ, вони не набули досі великого поширення в технічних системах, проте актуальність їхнього застосування не викликає сумнівів.

Нижче наведено аналіз основних методів і конструkcій пристроїв для отримання НЧВ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відкриття фулеренів у 1985 р. [1] (Нобелівська премія з хімії за 1996 р.) і розроблення технології їх отримання в макроскопічних кількостях [2] започаткували систематичні дослідження поверхневих структур вуглецю. Основним елементом таких структур є графітовий шар – поверхня, викладена правильними шестикутниками з атомами вуглецю, розташованими у вершинах. У разі фулеренів [1-3] така поверхня має замкнуту сферичну або сфероїдальну форму. Поверхнева структура фулеренів включає не тільки правильні шестикутники, кількість яких залежить від розміру молекули фулерену, але також 12 правильних п'ятикутників регулярним чином розташованих. Різноманітність незвичайних фізико-хімічних властивостей фулеренів і перспективи їхнього можливого використання цікавлять постійно дослідників з різних галузей науки і техніки.

Разом із сфероїдальними структурами графітовий шар може утворювати також і протяжні структури у вигляді порожнистого циліндра [4]. Подібні структури, які називаються нанотрубками, також відрізняються різноманітністю фізико-хімічних властивостей і мають значний інтерес у дослідників і технологів.

Незабаром після створення технології отримання фулеренів було виявлено [4], що в результаті термічного розпилення графітового анода в електричній дузі разом із молекулами, що належать до сімейства фулеренів, утворюються також протяжні структури, що являють собою згорнуті в одношарову або багатшарову трубку графітові шари. Довжина таких утворень, що отримали назву «нанотрубки», досягає десятків мікронів і на кілька порядків перевищує їхній діаметр, що становить від одного до декількох нанометрів. При цьому, на відміну від фулеренів, які осідають разом із сажею на стінках газорозрядної камери, нанотрубки знаходяться переважно на поверхні катода, звернені до міжелектродного проміжку.

Основними методами отримання вуглецевих нанотрубок є дуговий розряд, лазерна абеляція та каталітичне розкладання вуглецевмісних молекул на металічному каталізаторі. Отримувані вуглецеві матеріали в основному складаються з неупорядкованого вуглецю, одностінних і багатштинних нанотрубок, нановолокон і графенових наночастинок. Розподіл за складом вуглецевих фракцій у вихідному продукті визначає якість отриманого вуглецевого матеріалу і залежить від методу його отримання.



Найбільш чисті нанотрубки отримують при лазерній абеляції графітової мішені за присутності каталізатора. Однак вихід продукту дуже малий. Більш продуктивним є спосіб отримання наноматеріалів у дуговому розряді, хоч ступінь чистоти отриманих нанотрубок значно нижчий. Спосіб хімічного осадження ще недостатньо розроблений, але, судячи з попередніх результатів, є достатньо перспективним.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є покращення антифрикційних і протизносних властивостей індустриальних олив шляхом додавання мікро- та наночастинок вуглецю, отриманих методом випаровування графіту, і встановлення закономірностей впливу концентрації НЧВ на характеристики тертя і зношування в трибосистемах.

Для досягнення вказаної мети необхідно вирішити такі завдання:

1. Провести аналіз досліджень отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах і визначити оптимальний метод для отримання НЧВ.

2. Виконати теоретичні дослідження впливу концентрації мікро- та наночастинок вуглецю на процес зношування деталей транспортно-технологічних та енергетичних машин (ТТЕМ).

3. Виконати теоретичні дослідження процесу фізичної адсорбції мікро- та наночастинок вуглецю на металеві поверхні тертя.

4. Провести мікрофотографічні дослідження вуглецевої сажі, отриманої електродуговим методом і доданої до індустриальної оливи.

5. Встановити закономірності впливу концентрації вуглецевої сажі на трибологічні властивості індустриальних олив при їхньому використанні в парах.

## Основна частина досліджень

### 1. Аналіз методів отримання наночастинок вуглецю та їхніх фізичних властивостей

#### 1.1. Термічне розпилення

Найбільш поширений метод отримання вуглецевих нанотрубок використовує термічне розпилення графітового електрода в плазмі дугового розряду, що горить в атмосфері He [4]. Цей метод, що лежить також в основі найбільш ефективної технології виробництва фулеренів [2, 3], дає змогу отримувати нанотрубки в кількості, достатній для детального дослідження їхніх фізико-хімічних властивостей. У дуговому розряді постійного струму з графітовими електродами при напрузі 15-25 В, струмі кілька десятків ампер, міжелектродній відстані кілька міліметрів і тиску He кілька сот торрів ( $1 \text{ Torr} = 0,00133 \text{ Бар}$ ) відбувається інтенсивне термічне розпилення матеріалу анода. Продукти розпилення, що містять разом із частинками графіту також і фулерени, осаджуються на стінках розрядної камери, що охолоджується, а також на поверхні катода, більш холодного порівняно з анодом. Розглядаючи цей катодний осад за допомогою електронного мікроскопа, Іджима [4] виявив, що в ньому містяться протяжні циліндричні трубки довжиною понад мікрон і діаметром кілька нанометрів, поверхня яких утворена графітовими шарами. Трубки мають куполоподібні наконечники, що містять, подібно до молекул фулеренів, шестикутники і п'ятикутники. Трубки характеризуються різною хіральностю, тобто кутом орієнтації графітової площини відносно осі трубки.

В умовах експерименту [4] відносний вміст нанотрубок у катодному осаді не перевищує кілька відсотків, а оскільки трубки, як і інші вуглецеві частинки, присутні в катодному осаді, нерозчинні в органічних розчинниках, завдання їхнього виділення з осаду в чистому вигляді

пов'язане з серйозними технічними труднощами. Наступні дослідження з оптимізації виробництва нанотрубок і підвищення їхнього відносного виходу показали, що умови горіння дуги з графітовими електродами, оптимальні для виробництва нанотрубок, дещо відрізняються від умов, сприятливих з точки зору отримання фулеренів [5, 6]. Насамперед ця відмінність стосується тиску буферного газу (гелію – He), який в оптимальних, з точки зору виробництва нанотрубок, умовах становить не 100-150,

як у випадку фулеренів, а близько 500 Торр (0,66 Бар). Крім того, до підвищення виходу нанотрубок призводить використання катода великого діаметра (понад 10 мм).

Внаслідок оптимізації в установках, спроектованих спеціально з цією метою, стало можливим виробництво нанотрубок у грамових кількостях, а вміст нанотрубок у катодному депозиті перевищив 60 %. Схема однієї з таких установок, докладно описаної в роботі [7], наведена на рис. 1.

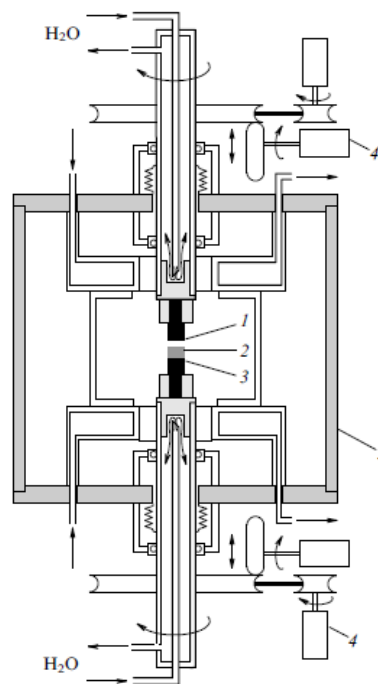


Рис. 1. Схема електродугової установки для отримання нанотрубок у грамових кількостях [7]:

- 1 – графітовий анод; 2 – осад, що містить нанотрубки; 3 – графітовий катод;  
 4 – пристрої для автоматичної підтримки міжелектродної відстані на заданому рівні;  
 5 – стінка камери. Стрілками показані напрямки прокачування води, що використовується для охолодження

У цій установці особливу увагу приділено організації ефективного відведення тепла від електродів, для чого вони поміщаються в мідні вставки, що охолоджуються за допомогою багатоканальної системи прокачування

води. Крім того, спеціальний автоматизований пристрій забезпечує підтримку міжелектродної відстані на фіксованому рівні 1-2 мм, що сприяє збільшенню стабільності параметрів дугового розряду, яка є необхідною умовою

отримання високого виходу нанотрубок [8, 9]. Максимальний вихід нанотрубок спостерігається при мінімальному струмі дуги, необхідному для її стабільного горіння. Випадкове підвищення струму лише на кілька хвилин перетворює гарну сажу з високим вмістом нанотрубок на марний твердий шматок спеченого графіту. При використанні в роботі [7] циліндричних електродів діаметром 12,5 мм напруга дуги становила 17-20 В, а струм змінювався в діапазоні 110-130 А; у разі використання електродів діаметром 19 мм значення цих параметрів становили 17-19 і 250-300 А відповідно. При цьому на поверхні катода вдавалося зібрати до 90 % усієї маси вуглецю, що виділяється з поверхні анода внаслідок його термічного розпилення. Як показують спостереження, виконані за допомогою сканувального електронного мікроскопа, багаточислові нанотрубки, що утворюються, довжиною до 40 мкм відростають від катода перпендикулярно до його плоскій поверхні і зібрані в циліндричні пучки діаметром близько 50 мкм. Ці пучки рівномірним шаром покривають поверхню катода, утворюючи стільникову структуру, у якій простір між пучками заповнено сумішшю неупорядкованих наночастинок, що також містять нанотрубки. Нанотрубки в пучку мають тенденцію до спікання. Ієрархічна структура сажі, що містить нанотрубки, розглянута також у роботі [9]. За спостереженнями, нанотрубки, зібрані в невеликі пучки, які разом із наночастинами утворюють нитки діаметром до 50 мкм, у свою чергу утворюють нитки більшого діаметра, придатні для спостереження неозброєним оком. В оптимальних умовах вихід нанотрубок із прикатодної сажі досягає 60 %.

Дослідження, виконані за допомогою електронного мікроскопа високої роздільної здатності, показали, що осад, який утворюється на катоді в результаті горіння дуги з графітовими електродами, має складну просторову структуру. Так, у

роботі [10], у якій діаметри графітового катода і анода становили 2,5 і 1,25 см відповідно при тиску  $\text{He}$  100 Торр, розрядному струмі 180-200 А і напрузі 20-30 В, зазначено, що на поверхні катода осаджувалася сажа у формі циліндра, що складається з сірого стрижня, покритого чорним кільцем, оточеним сірою оболонкою. Чорне кільце містило безліч нанотрубок різного діаметра і завдовжки десятки мікрометрів. Перехідна область між чорним кільцем і зовнішньою оболонкою містила частинки вуглецю, укладені у графітову оболонку.

### *1.2. Лазерне розпилення*

Як і фулерени, вуглецеві нанотрубки отримують у результаті термічного розпилення графіту. При цьому разом із газорозрядним нагріванням з цією метою ефективно використовуються також інші методи концентрації енергії на графітовій поверхні. Так, у роботі [11] джерелом висококонцентрованої енергії служило імпульсне випромінювання лазера на неодимовому склі. Графітовий стрижень (мішень) діаметром 1,25 см знаходився всередині кварцової трубки діаметром 2,5 см і довжиною 50 см, яку у свою чергу поміщали в піч. Мішень обдувалася аргоном при тиску 500 Торр (0,66 Бар) і опромінювалася імпульсами другої гармоніки випромінювання неодимового лазера ( $\lambda = 0,532$  мкм) тривалістю 10 нс, енергією 250 мДж за частоти повторення 10 Гц. Діаметр лазерної плями на мішені становив 3 або 6 мм. Зразки сажі збиралися з водоохолоджуваного приймача, що розміщується в нижньому по потоку кінці трубки, зі стінок кварцової трубки та нижньої частини поверхні графітового стрижня. Ці зразки містили багаточислові нанотрубки з кількістю шарів 4-24 довжиною до 300 нм. Одношарових нанотрубок в осаді не виявлено. Зі зменшенням температури печі якість нанотрубок падала від бездефектних за температури 1200 °С до багатьох дефектами за температури 900 °С і повної відсутності

нанотрубок за температури 200 °С. Аналогічна температурна залежність виходу має місце при синтезі фулеренів методом лазерного випаровування. Передбачається, що нанотрубки зростають у газовій фазі.

При синтезі нанотрубок у результаті термічного впливу лазерного випромінювання використання металевих каталізаторів призводить до такого самого якісного ефекту, як у розглянутому вище випадку електродугового синтезу. Зміст нанотрубок у сажі різко зростає, якість значно поліпшується. При цьому замість багат шарових нанотрубок, що характеризуються значним розкидом у діаметрах, утворюються переважно одношарові трубки, діаметр яких змінюється у відносно вузькому інтервалі.

У цьому плані показовою є робота [13], по суті продовження цитованої роботи [12]. Тут також використовувалася описана вище експериментальна камера, що поміщається в піч і пристосована для опромінення графітової мішені імпульсами лазерного випромінювання, проте зразки, що опромінювали, являли собою суміш графіту і невеликої кількості металевого порошку. Ці зразки виготовляли у три стадії. На першій стадії пастою, що утворюється в результаті змішування високочистого металу або оксиду металу з вуглецевим зв'язуванням, заповнювали форму діаметром 1,25 см. Потім форму поміщали під гідравлічний прес і витримували за температури 120 °С під постійним тиском протягом 4-5 год. Стрижень вулканізувався за температури 810 °С протягом 8 год під потоком аргону. Отримані мішені нагрівалися в потоці аргону до 1200 °С протягом 12 год. Крім того, перед кожним новим експериментом з однією і тією самою мішенню її витримували в потоці аргону за температури 1200 °С протягом 2 год. Метали використовувалися в таких концентраціях (атомні %): Cu (0,6); Nb (0,6); Ni (0,6); Pt (0,2); Co/Ni (0,6/0,6); Co/Pt (0,6/0,2);

Co/Cu (0,6/0,5); Ni/Pt (0,6/0,2). Випромінювання другої гармоніки ( $X = 0,532$  мкм) імпульсного неодимового лазера з енергією в імпульсі 300 МДж фокусувалося на площину металграфітового композита в пляму діаметром 6-7 мм. Мішень перебувала в камері, якою прокачувався аргон при тиску 500 Торр. Камеру розміщували в печі, температура якої могла досягати 1200 °С. Сажа, утворювана в результаті лазерного термічного розпилення мішені, неслася потоком аргону з нагрітої області і осідала на мідний колектор, охолоджуваний водою. Зразки сажі диспергувалися в метанолі за допомогою ультразвуку протягом 1 год, після чого досліджувалися під електронним мікроскопом. Як свідчать дослідження, у сажі разом із наночастинками, що мають форму багатогранників, присутні одношарові нанотрубки діаметром близько 1 нм, вихід яких зростає з підвищенням температури печі. При використанні каталізатора одного металу максимальний вихід нанотрубок спостерігається у випадку Ni, наступним є Cu. Pt дає невеликий вихід, а використання Cu і Nb взагалі не призводить до утворення нанотрубок.

Найбільш яскраво високі можливості методу лазерного випаровування графіту при селективному отриманні нанотрубок із заданими характеристиками були продемонстровані в недавніх експериментах [14, 15], у яких графітова мішень з домішкою нікелевого каталізатора опромінювалася одночасно двома лазерами різної довжини хвилі видимого діапазону. При цьому відбувається переважно (з виходом до 90 %) утворення одностінних нанотрубок певного діаметра (138 нм), що відповідає певній хіральності.

### 1.3. Електролітичний синтез

Фізичні умови, що сприяють утворенню нанотрубок, дуже різні. Зокрема, нанотрубки ефективно утворюються не тільки в умовах низькотемпературної приповерхневої плазми, яка виникає при електродуговому

або лазерному розпиленні графітової мішені, але також при електролізі, коли всі компоненти процесу знаходяться в конденсованому стані. Уперше електролітичним шляхом нанотрубки отримані в роботі [16], у якій як анод запропоновано використовувати графітовий куб розміром 5 x 5 x 5 см з отвором діаметром 2,5 і глибиною 3 мм, заповненим 1 г солі LiCl. Розплавлена сіль, нагріта до температури 600 °С, служила електролітом. Графітовий катод, що занурюється в розплав, мав діаметр 3 мм. Внаслідок пропускання через електроліт струму 30 А протягом 1 хв на поверхні катода відбувалося утворення нанотрубок та інших наночастинок вуглецю, які досліджувалися за допомогою електронного мікроскопа.

Удосконалений варіант установки для електролітичного синтезу нанотрубок зображений на рис. 2 [17, 18]. У центрі

циліндра діаметром 4 і довжиною 10 см, що відіграє роль анода, висвердлено циліндричний отвір діаметром 3 і глибиною 7 см. Як катод використовувалися графітові стрижні діаметром 3 мм, занурювані в сухий LiCl на глибину 1-3 см. Система заповнювалася Ar при тиску до 500 Торр. Тигель нагрівався до температури плавлення LiCl (604 °С). Електроліз здійснювався при струмах 1, 3, 5, 10, 20 і 50 А, напрузі до 20 В і глибині занурення катода в електроліт від часток сантиметра до 4 см протягом 2 хв. Це давало 30-80 мг вуглецевого матеріалу, який потім протягом 4 год оброблявся в суміші толуолу з водою. Сухий залишок оброблявся за допомогою ультразвуку в ацетоні протягом 20 хв, після чого зразки суспензії наносили піпеткою на мідно-графітову сітку електронного мікроскопа діаметром 3 мм і висушували.

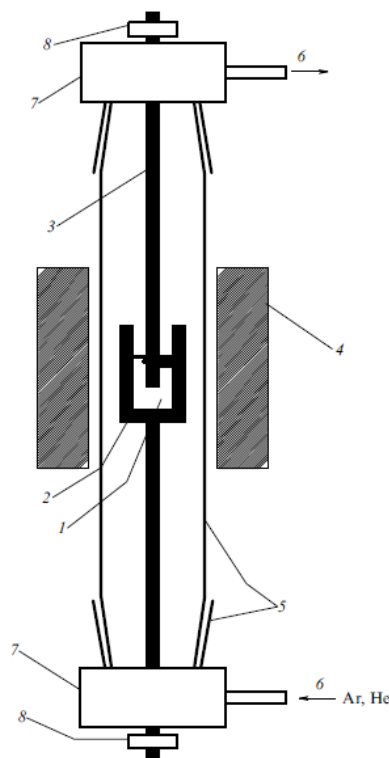


Рис. 2. Схема експериментальної установки для електролітичного синтезу нанотрубок [17, 18]:  
 1 – рідкий електроліт; 2 – графітовий анод з отвором; 3 – графітовий катод;  
 4 – піч; 5 – кварцова трубка; 6 – трубки для прокачування газу; 7 – мідні фланці;  
 8 – кільця ущільнювачів

#### 1.4. Інші методи отримання нанотрубок

Вуглецеві нанотрубки, як і фулерени, ефективно утворюються в широкому діапазоні умов, тому при їхньому синтезі використовуються різні методи та підходи. Разом із наведеними вище слід згадати також роботу [19], у якій продемонстрована можливість отримання фулеренів і нанотрубок у полум'ях ацетилену, бензолу або етилену, попередньо змішаних з киснем і буферним газом. Тиск газу змінювався в діапазоні 20-97 Торр; атомне відношення C/O становило 1,06 у разі  $C_2H_2$ , 0,86-1,0 – у разі  $C_6H_6$ , 1,07 – у разі  $C_2H_6$  за швидкості потоку газу в пальнику  $25-50 \text{ см} \cdot \text{с}^{-1}$  і максимальній температурі полум'я близько  $2000 \text{ }^\circ\text{K}$ . Зразки сажі відбиралися з полум'я з використанням водоохолоджуваного зонда, що всмоктує, і зі стінок камери згорання, після чого диспергувалися в толуолі за допомогою ультразвуку. Як показує аналіз, виконаний на електронному мікроскопі високої роздільної здатності, зразки містили близько 10 % багатосферних наночастинок розміром 2-15 нм з відстанню між шарами 0,34-0,36 нм. Деякі частинки являли собою циліндричні нанотрубки з двома півсферами на кінцях.

#### Обговорення результатів аналізу.

Порівняння результатів роботи установок, заснованих на різних методах одержання нанотрубок і фулеренів, показує, що найбільш чистий і якісний продукт отримують при лазерному випаровуванні графіту, проте це тривалий, трудомісткий і дорогий процес. Вихід корисних продуктів становить до 20 %.

Термічний метод має свої переваги та недоліки. До переваг слід віднести доступність і дешевизну вуглецевої сировини: від нафти, вуглецевих газів до міських відходів. Усі вони є джерелами нанотрубок і фулеренів при використанні термічного методу. Вихід корисних нанопродуктів середній за величиною, а чистотою досягає 90-95 %.

Найпростішим серед відомих є електродуговий метод отримання нанотрубок і фулеренів. Проте вихід корисних продуктів не перевищує 15 %. Крім того, велика кількість конструкцій реакторів для отримання високоструктурованих наночастинок вуглецю свідчить про те, що досі не знайдено прийнятну конструкцію, яка б гарантувала отримання продукту з заданими властивостями, стабільними параметрами та в необхідних кількостях.

Незважаючи на наявні результати численних досліджень, НЧВ поки що не мають застосування на транспорті, проте, урахувавши унікальні властивості, застосування їх у транспортному машинобудуванні можливе в найближчій перспективі.

Основними напрямками використання НЧВ у цій галузі є:

- створення нових конструкційних матеріалів. Так, за дослідженнями Дженерал Моторс, додавання 11,5 % вуглецевих нанотрубок до поліпропілену призводить до збільшення його міцності на розрив удвічі. Дослідження Токійського університету показали, що додавання 5 % нанотрубок до алюмінію також збільшує його міцність на розрив удвічі. Теоретичні розрахунки показують прогнозоване збільшення міцності сталей і сплавів у шість разів при додаванні до них близько 10 % вуглецевих нанотрубок;

- створення нових антифрикційних матеріалів. Сьогодні можна використовувати НЧВ як легуючу добавку до металевих або композиційних антифрикційних матеріалів підшипників ковзання, напрямних опор тощо;

- створення високоякісних мастильних матеріалів з використанням як присадки НЧВ. Про позитивний вплив таких нанооб'єктів на процеси тертя і зношування в машинах свідчать різні джерела інформації, наприклад [8]. За проведеними дослідженнями, використання вуглецевих фулеренів і наночастинок

графіту, що містяться у фулереновій сажі, як добавки до пластичних мастил Солідол Ж і Літол-24 у кількості 1-1,5 % зменшує коефіцієнт тертя сталевих зразків до двох разів, а інтенсивність зношування до 2,5 раза залежно від режимів навантаження.

Список перелічених напрямів далеко невичерпаний, а розкриваються в роботі лише ті, що можуть бути реалізовані в найближчому майбутньому.

## **2. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на мастильну здатність оливи**

### *2.1. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на мастильну плівку*

#### *2.1.1. Поверхневий шар матеріалу*

Поверхневий шар матеріалу (ПШМ) включає зовнішню поверхню, що має безпосередній контакт з навколишнім середовищем, так званий граничний шар, і нижній шар деформованого металу, що відрізняється від основної частини (серцевини) металу своєю будовою, механічними, фізичними і хімічними властивостями.

#### *2.1.2. Граничний шар*

Ідеальна структура матеріалу передбачає, що кожен атом, розташований всередині нього, зазнає впливу силових полів навколишніх атомів і перебуває у стані рухливої стійкої рівноваги.

Атоми на поверхні мають зв'язки тільки з сусідніми та нижніми атомами і тому перебувають у невірноваженому та нестійкому стані.

У результаті цього граничний шар металу, що включає приблизно два ряди атомів (товщина його  $5 \times 10^{-10}$  -  $10^{-9}$  мм або 0,5-1 нм) [20], має запас вільної поверхневої енергії. Цю поверхневу енергію можна подати як суму потенційної і кінетичної енергії. Потенційній енергії відповідають спотворення нормальної побудови решітки, а кінетичній – зміна режиму коливань атомів у граничному шарі. З кінетичною енергією пов'язана сильна залежність поверхневої напруги від температури.

Через підвищену активність поверхня ПШМ твердого тіла неминуче адсорбує елементи навколишнього середовища та буває покрита шарами адсорбованих газів, парів води та жирів, що часто осаджуються прямо з повітря.

Так, після технічного очищення гасом (уайт-спіритом) або бензином шар жирів становить 1-5 мкм, а при дуже ретельному очищенні – 0,01-0,1 мкм, або шар товщиною 10-100 молекул. Товщина найтоншого шару адсорбованих парів відповідає товщині однієї молекули жирної кислоти, що дорівнює 0,002-0,004 мкм (2-4 нм). Товщина адсорбованої водяної пари становить 50-100 молекулярних шарів і навіть при температурі нагріву до 800-900 °С на поверхні зберігається водяна плівка завтовшки один молекулярний шар. ПШМ сильно адсорбує також гази, при цьому особливо міцні зв'язки дає хімічна адсорбція, при якій товщина шару газів становить  $10^{-9}$ - $10^{-8}$  мм (1-10 нм) [20].

Адсорбовані шари оливи, особливо поверхнево-активної (ПАР), значно впливають на величину поверхневої енергії та процес пластичного деформування, диспергування поверхневих шарів і міцність металу, оскільки адсорбція знижує поверхневий натяг та енергію поверхневих атомів і полегшує розвиток деформації.

ПШМ і особливо тріщини в ньому чи мікротріщини є хіба що воротами, якими чужорідні атоми проникають у тверде тіло.

Вплив навколишнього середовища призводить до виникнення на поверхні хімічних сполук, найчастіше різних оксидів. Наприклад, біля сталі від поверхні в тіло слідує оксиди  $Fe_2O_3$ ;  $Fe_3O_4$ ;  $FeO+Fe_3O_4$ ;  $FeO$ .

Загальна товщина зовнішньої плівки становить у залізі від 1,5-2,5 до 5 нм; у сталі 1-2 нм; цинку 0,5-0,6 нм; алюмінії 10-15 нм.

#### *2.1.3. Нижній шар*

Цей шар або частина ПШМ зазвичай складається з сильно деформованого та зміцненого металу. Це основна

полікристалічна структура, що складається з більш-менш рівноважних кристалічних зерен неправильної форми з розмірами від 0,01 до 1,0 мм, зв'язаних міжзеренним прошарком. Ці зерна (кристаліти) побудовані з рядів визначених атомів, що утворюють відповідні цьому металу кристалічні решітки.

Міжзеренний прошарок має спотворену кристалічну решітку з дислокованими атомами основного матеріалу та домішок, що інтенсивно накопичуються біля границь зерен. Прошарок має розпушену будову з ослабленими силами зчеплення та підвищеною енергією атомів. Товщина прошарку становить 5-20 атомних шарів. Чим шар нижче, тим і серцевина металу істотно відрізняється за міцністю від теоретичної міцності цього металу. Так, критичне напруження зсуву  $\tau_{кр}$ , необхідне для здійснення пластичної деформації, теоретично дорівнює  $\tau_{кр.теор} G/30$ , МПа: залізо –  $\tau_{кр.теор} 2300$  МПа; мідь –  $\tau_{кр.теор} 1540$  МПа і нікель –  $\tau_{кр.теор} 2600$  МПа [20].

Реальні значення критичної напруги зсуву  $\tau_{кр.реал}$  для цих же металів: 29 МПа; 1 МПа та 5,8 МПа. Такі великі розбіжності між теоретичною та фактичною міцністю металів пояснюються наявністю в реальних полікристалах різних недосконалостей і дефектів решітки: точкових дефектів у вигляді вакансій, дислокованих атомів і домішок і лінійних дефектів у вигляді дислокацій різного типу. Дислокації особливо сильно впливають на зниження міцності реальних металів, виникають у реальному кристалі у процесі його зростання з розплаву чи розчину. У недеформованому кристалі джерелом

дислокацій можуть бути скупчення вакансій.

Бездефектні кристали (часто це монокристали) отримані як тонкі нитки товщиною 0,05-0,2 мкм і довжиною 2-10 мм. Межа міцності в них для різних металів така: залізо – 360 МПа; мідь – 260 МПа; цинк – 180 МПа. Пружна деформація в ниткоподібних кристалів досягає кількох відсотків, а звичайних – сотих часток відсотка.

Щільність дислокації  $\rho$  (шт./см<sup>2</sup>) у бездефектних кристалів (монокристалів високої чистоти) становить 0-10<sup>3</sup>; звичайних відпалених монокристалів 10<sup>5</sup>-10<sup>6</sup>; відпалених полікристалів 10<sup>7</sup>-10<sup>8</sup>; металу після інтенсивної холодної деформації 10<sup>10</sup>-10<sup>12</sup> [20].

## 2.2. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на фізико-механічні властивості металу

Для побудови моделі фізичної адсорбції частинок НЧВ була розроблена розрахункова схема сил [21], що діють на частинку (рис. 3). Якщо на частинку діють лише сили  $F_E$  і  $F_C$ , то силою тяжіння та архімедовою силою можна знехтувати. Сила електростатичної взаємодії частинки з поверхнею залежить від двох основних факторів, а саме ступеня її поверхневої активності та величини силового поля поверхні тертя. За рис. 3,

$$h = x_0 - x \quad (1)$$

Залежність для сили електричної взаємодії буде мати вигляд

$$F_E = -P \frac{dE_{II}}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot \frac{(1 - \frac{h}{\sqrt{r^2 + h^2}})}{dh} = \frac{P\sigma}{2\pi\epsilon\epsilon_0} \cdot (\frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x_0 - x)}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}}) \quad (2)$$



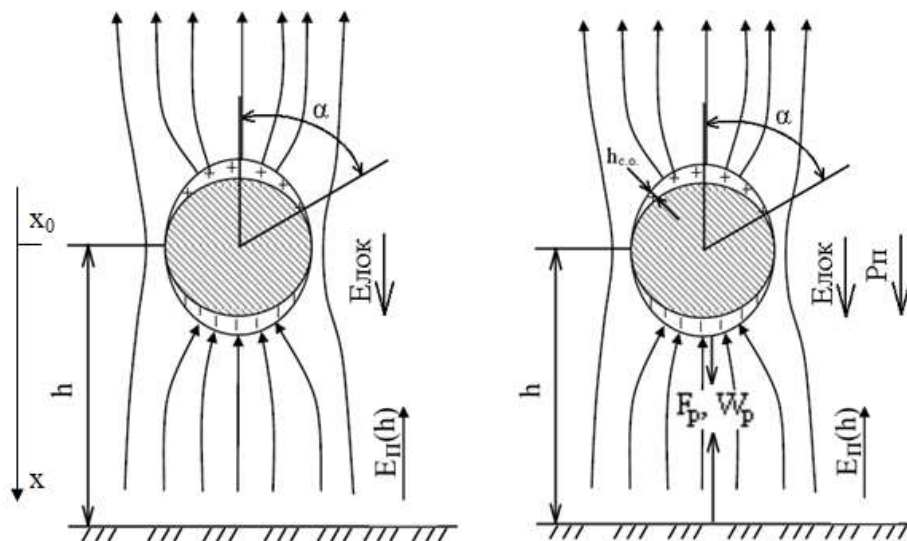


Рис. 3. Розрахункова схема взаємодії частинки з поверхню тертя:

$Ox$  – вісь, що вказує на напрямок руху елемента;  $x_0$  – початкова відстань до поверхні, м;  $F_E$  – сила електростатичної взаємодії (тяжіння), Н;  $F_C$  – сила опору руху (сила Стокса), Н;  $E_{\Pi}$  – напруженість силового поля металеві поверхні, В/м;  $E_{лок}$  – напруженість локального поля навколо частинки, В/м

Виходячи з положень класичної електростатики, взаємодія наночастинки НЧВ з металевою поверхню тертя протікає у три етапи: потрапляння частинки в область дії силового поля та її електризація (ліва частина рис. 3); частинки вкриті сольватною оболонкою молекул з формуванням «жорсткого» електричного диполя; адсорбція «жорсткого» електричного диполя – частинки, вкритої молекулами оливи, на поверхню металу (права частина рис. 3).

Визначення дипольного моменту частинки НЧВ виконаємо на основі рекомендацій [22] як

$$P = 4\pi\epsilon_0(R_i + h) \cdot E_{\Pi}(h), \quad (3)$$

де  $R_i$  – радіус частинки, м;

$h$  – товщина сольватної оболонки, м.

Одним із головних завдань також є визначення щільності поверхневого заряду  $\sigma$ ; вирішується з застосуванням моделі «желе». Ураховуючи положення такої моделі, для поверхневого заряду запишемо

$$\sigma = \frac{q^+ - |q^-|}{\lambda^2}, \quad (4)$$

де  $q^+$ ,  $q^-$  – заряди відповідно іонного вузла поверхні та електронного газу поблизу іонного вузла, Кл;

$\lambda$  – період атомарної шорсткості поверхні (приблизно дорівнює періоду кристалічної решітки металу), м.

Поснавши залежності (3) і (4), отримаємо залежність для сили електростатичної взаємодії частинки з металевою поверхню

$$F_E = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\epsilon\epsilon_0\lambda^2} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right). \quad (5)$$

Скориставшись залежністю (5) отримаємо рівняння руху частинки диполя в кінцевому вигляді:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = \frac{P(q^+ - |q^-|)}{2\pi\epsilon\epsilon_0\lambda^2} \left( \frac{1}{\sqrt{r^2 + (x_0 - x)^2}} - \frac{x(x - x_0)}{\sqrt[3]{r^2 + (x_0 - x)^2}} \right) - 6\pi R\mu \frac{dx}{dt}. \quad (6)$$

Залежність (6) урахує як властивості частинок НЧВ – розмір і дипольний момент, так і в'язкість базової оливи та властивості металевої поверхні тертя, на якій адсорбується частинка. До таких властивостей належить період кристалічної решітки металу та його валентність. Зазвичай ідеться про «ювенільну» ділянку поверхні тертя, що

утворюється в процесі зношування та екранується частинками НЧВ та молекулами оливи. На рис. 4 наведені результати частинного розв'язання рівняння (6) в програмному середовищі MathCAD, за якими встановлена закономірність зміни часу адсорбції частинок НЧВ залежно від їхнього радіуса та початкової відстані до поверхні.

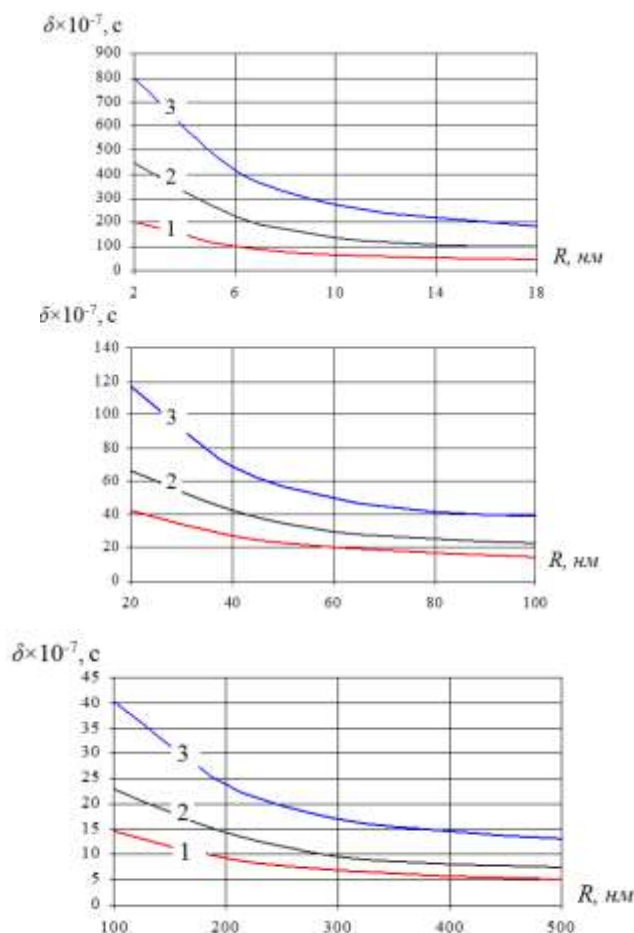


Рис. 4. Зміна часу адсорбції частинок МНЧВ залежно від радіуса та початкової відстані:  
 1 –  $x_0 = 1$  мкм; 2 –  $x_0 = 1,5$  мкм; 3 –  $x_0 = 2$  мкм

Отримані закономірності розкривають механізм фізичної адсорбції частинок НЧВ у вигляді електричних диполів. Як видно з графіків рис. 4, час адсорбції нелінійно залежить як від радіуса мікро- та наночастинок НЧВ, так і від початкової відстані частинок до поверхні. Наприклад, при зміні радіуса з 2 до 500 нм і початковій відстані 1 мкм час змінюється приблизно в 40 разів, а при початковій відстані 2 мкм – приблизно в 60 разів. Час адсорбції, за виконаними розрахунками, складає від  $10^{-7}$  до  $10^{-4}$  с залежно від радіуса, що підтверджує отримані раніше експериментальні дані інших дослідників [23]. У цілому розроблена фізична та математична моделі (залежність (б)) процесу фізичної адсорбції електропровідних частинок НЧВ дають змогу отримати практичні дані щодо їхнього розміру та потрібної концентрації в базовій оливі залежно від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

Слід зазначити також, що, за експериментальними даними інших дослідників [24], отримані дані відносно часу фізичної адсорбції окремих молекул і їхніх агрегатів складають близько  $10^{-9}$ - $10^{-6}$  с, що підтверджує першочерговість формування сольватної оболонки, а вже потім прояв адсорбції частинок НЧВ.

### 2.3. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ на тертя і знос у технічних системах

Нанесення поверхнево-активних речовин (ПАР) на тверді поверхні можна здійснювати в процесі складання агрегатів і вузлів механізмів або експлуатації через робоче середовище, що є ультрадисперсною системою «олива – ПАР».

Одним з основних факторів, що визначають довговічність і надійність роботи різних двигунів і механізмів, є знос контактуючих поверхонь вузлів тертя, що значною мірою позначається на ресурсі їхньої роботи.

Для зниження величини і стабілізації умов тертя, а також запобігання інтенсивному зносу у вузлі тертя вводять різні мастильні середовища. Однак дуже часто вони не дають бажаного ефекту, оскільки в результаті розігріву оливи стікають з поверхні, видавлюються з зони тертя, внаслідок чого в точках контакту виникає нестача.

Слід також зазначити, що фізико-хімічні та експлуатаційні властивості оливи і мастил у процесі їхньої експлуатації у двигунах і механізмах погіршуються набагато раніше, ніж настає час їхньої заміни при технічному обслуговуванні.

Для вирішення зазначеної проблеми доцільно використовувати результати напрямів, що бурхливо розвиваються останнім часом, у фундаментальній і прикладній науці, таких як нанотехнології, наносистеми і наноматеріали.

Однією з властивостей нанооб'єктів є самоорганізація, що отримала розвиток у теорії мономолекулярної адсорбції Ленгмюра [25]. Адсорбція молекул ПАР відбувається активними центрами, які завжди існують на твердій поверхні. Такими центрами можуть бути піки та піднесення, наявні на будь-якій, навіть найгладшій, поверхні. Внаслідок малого радіуса дії адсорбційних сил, що мають природу, близьку до електростатичної, і здатності їх до насичення кожен активний центр, адсорбуючи молекулу ПАР, стає вже нездатним до подальшої адсорбції. У результаті цього на поверхні може утворитися лише мономолекулярний шар ПАР (рис. 5).

Відомо, що в машинобудуванні прагнуть забезпечити гідродинамічний режим тертя у всіх вузлах, тобто ввести в них рідинне мастило [26], коли здійснюється повний поділ поверхонь, що труться, у результаті тиску, що виникає в рідині при відносному русі поверхонь.

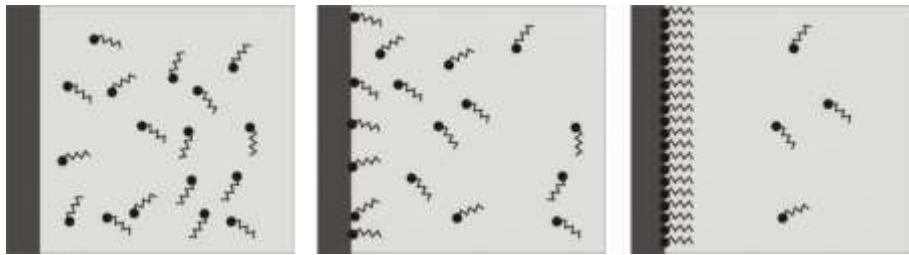


Рис. 5. Процес формування моношару орієнтованих молекул ПАР на поверхні твердого тіла

Сила тертя ( $F$ ) при взаємному переміщенні двох поверхонь твердих тіл складається з адгезійного  $F_a$  і когезійного  $F_k$  опорів

$$F = F_a + F_k. \quad (7)$$

Залежно від виду та умов тертя, а також структури тіл і зв'язків у них окремі складові формули (7) можуть збільшуватися або зменшуватися і навіть зникати зовсім. Так, при внутрішньому терті мастила адгезійна складова близька до нуля, а при зовнішньому терті ідеально гладких поверхонь когезійний компонент дорівнював би нулю. Крім зазначених крайніх випадків, коли один із доданків дорівнює нулю, існує безліч проміжних ситуацій, при яких обидва доданки мають значні величини [27].

При гідродинамічному режимі частинки мастила, що стикаються з поверхнями контакту, міцно адсорбуються на них, проміжні ж шари рухаються в

зазорі між поверхнями, що труться (рис. 6), підкоряючись законам гідродинаміки.

В'язкість мастила ( $\eta$ ) є найважливішою фізико-хімічною властивістю, що впливає на силу тертя ( $F$ ):

$$F = \eta VS/H, \quad (8)$$

де  $V$  – відносна швидкість руху поверхонь;  
 $H$  – товщина шару мастила;  
 $S$  – площа ковзання.

$$H = \sum \Delta h_i,$$

де  $\Delta h_i$  – товщина елементарного шару.

З формули (8) випливає, що сила тертя є функцією таких величин:

$$F = f(\eta, V, S, H). \quad (9)$$

Величини  $S$  і  $V$  задаються конструкційними та експлуатаційними характеристиками на етапі проєктування вузлів, механізмів і систем двигуна.

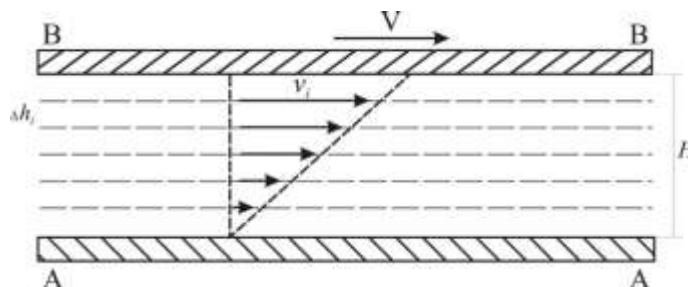


Рис. 6. Механізм внутрішнього тертя при взаємному ковзанні твердих тіл:

BB – рухоме тверде тіло; AA – нерухоме тверде тіло;  $V$  – відносна швидкість руху твердих тіл;  $\Delta h_i$  – товщина елементарного шару мастила, між якими за наявності градієнта швидкості виникає внутрішнє тертя;  $v_i$  – швидкість  $i$ -го шару;  $H$  – товщина шару мастила

Наблизити процес тертя до ідеального можна за допомогою організації тертя, тобто шляхом зменшення його залежності від в'язкості мастила ( $\eta$ ) і кількості шарів,

що зсуваються. Цей результат можна забезпечити, створивши на поверхнях контакту моношари з ПАР (рис. 7).

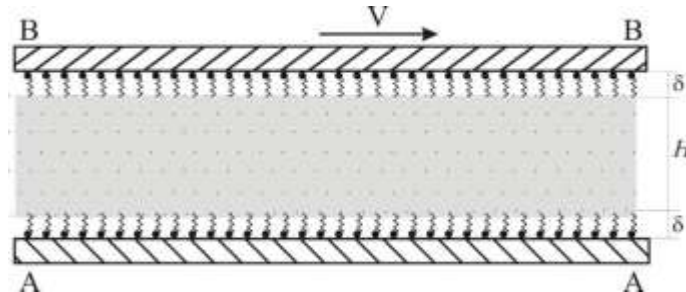


Рис. 7. Механізм внутрішнього тертя при взаємному ковзанні двох твердих тіл, на поверхнях яких нанесено моношар ПАР:

BB – рухоме тверде тіло; AA – нерухоме тверде тіло; V – відносна швидкість руху твердих тіл; H – товщина шару мастила;  $\delta$  – товщина моношару орієнтованих молекул ПАР на поверхні твердого тіла

Отримані мономолекулярні плівки запобігають адсорбції мастила твердою поверхнею, що значно зменшує залежність сили тертя від в'язкості мастильного матеріалу і тертя між його шарами.

Отже, ми максимально наближаємо процес тертя до ідеального.

Розглянемо інший аспект процесу тертя – знос поверхонь тертя. Відомо, що гідродинамічний режим роботи мастила при відповідній в'язкості, допустимих відносних швидкостях переміщення поверхонь, що труться, не дуже високих навантаженнях і температурах дає змогу отримати товсту мастильну плівку, яка має повністю захистити вузол тертя двигуна від зносу. Практика показує, що знос, проте, має місце. Справа в тому, що, по-перше, дуже важко повністю очистити мастильний матеріал від абразивних частинок; по-друге, не завжди, особливо в момент торкання, вузол тертя «потрапляє» в гідродинамічний режим, а при великих навантаженнях мастило видавлюється з вузла тертя.

**Висновки.** 1. Мета і завдання дослідження досягнуто. Проведено аналіз останніх досліджень методів і приладів

отримання наночастинок вуглецю. Визначено сферу їхнього практичного застосування.

2. За проведеним аналізом досліджень отримання наночастинок вуглецю та їхнього застосування в трибологічних системах, для промислового отримання НЧВ може бути використаний термічний метод. Для лабораторного отримання та проведення науково-дослідних робіт у галузі вивчення НЧВ доцільно використовувати електродуговий метод і метод лазерного випаровування. Вони поєднують можливість управління складом вихідного продукту з простотою отримання НЧВ.

3. Найбільш перспективним щодо застосування високоструктурованих наночастинок вуглецю є створення нових конструкційних антифрикційних матеріалів і присадок до мастильних матеріалів.

4. Впровадження НЧВ потребує проведення спеціальних теоретичних та експериментальних досліджень.

5. Аналіз досліджень з вивчення впливу НЧВ показав, що існує залежність для визначення інтенсивності зношування

пар тертя ковзання при пружному контакті, яка враховує концентрацію НЧВ в оливі та тиск у контакті. За отриманою залежністю, інтенсивність зношування обернено пропорційна концентрації НЧВ і прямо пропорційна контактному тиску.

6. Наведена математична модель процесу фізичної адсорбції електропро-

відних частинок НЧВ на металевій поверхні дає змогу отримати практичні рекомендації щодо їхнього розміру та потрібної концентрації в базовій оливі залежно від швидкості відносного переміщення нано- та мікроскопічних ділянок зношування поверхонь тертя.

### Список використаних джерел

1. Kroto H. W. et al. Buckminsterfullerene. *Nature*. 1985. № 318. Pp. 162-163. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(351jmbntvnsjt1aadkozje\)\)/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1590802](https://www.scirp.org/(S(351jmbntvnsjt1aadkozje))/reference/referencespapers.aspx?referenceid=1590802) (last access: 30.09.2023).
2. Kraetschmer W. et al. Solid C60: A New Form of Carbon. *Nature*. 1990. № 347. Pp. 354-358. URL: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-0531-9\\_7](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-1-4612-0531-9_7) (last access: 25.10.2023).
3. Воронін С. В., Онопрейчук Д. В., Суранов О. О., Амінов Д. О. Огляд та аналіз конструкцій установок для отримання наночастинок вуглецю електродуговим методом. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. Харків: УкрДАЗТ, 2013. Вип. 141. С. 253-258. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/72468> (дата звернення: 28.10.2023).
4. Iijima S. Helical Microtubules of Graphitic Carbon. *Nature* (London). 1991. № 354. Pp. 56-58. URL: [https://www.scirp.org/\(S\(i43dyn45teexjx455qlt3d2q\)\)/journal/paperinformation.aspx?paperid=48803](https://www.scirp.org/(S(i43dyn45teexjx455qlt3d2q))/journal/paperinformation.aspx?paperid=48803) (last access: 15.08.2023).
5. Harris P. J. Carbon Nanotubes and Related Structures. Cambridge: Cambridge University Press. 1999. 23 p.
6. Dresselhaus M. S., Dresselhaus G. and Saito R. Carbon Fibers Based on C60 and Their Symmetry. *Physical Review*. 1992. В 45, 6234. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.45.6234>
7. Hamada N., Sawada S. and Oshiyama A. New One-Dimensional Conductors: Graphitic Microtubules. *Physical Review Letters*. 1992. № 68, 1579. URL: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.68.1579> (last access: 11.03.2023).
8. Iijima S. and Ichihashi T. Single-Shell Carbon Nanotubes of 1-nm Diameter. *Nature*. 1993. № 363. Pp. 603-605. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/363603a0> (last access: 17.07.2023).
9. Ebbesen T. W. and Ajayan P. M. Large-Scale Synthesis of Carbon Nanotubes. *Nature*. 1992. № 358. Pp. 220-222. URL: <http://dx.doi.org/10.1038/358220a0> (last access: 04.12.2023).
10. Charlier J.-C. and Iijima S. Growth Mechanisms of Carbon Nanotubes. *Topics in Applied Physics*. 2001. № 80. Pp. 55-81. URL: [http://dx.doi.org/10.1007/3-540-39947-X\\_4](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-39947-X_4) (last access: 27.11.2023).
11. Krause B., Ritschel M. et al. Comparison of Nanotubes Produced by Fixed Bed and Aerosol-CVD Methods and Their Electrical Percolation Behaviour in Melt Mixed Polyamide 6.6 Composites. *Composites Science and Technology*. 2010. № 70. Pp. 151-160. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compscitech.2009.09.018> (last access: 12.10.2023).
12. Mayne M., Grobert N. et al. Pyrolytic Production of Aligned Carbon Nanotubes from Homogeneously Dispersed Benzene-Based Aerosols. *Chemical Physics Letters*. 2001. № 338. Pp. 101-107.
13. Barreiro A., Kramberger C. et al. Control of the Single-Wall Carbon Nanotube Mean Diameter in Sulphur Promoted Aerosol-Assisted Chemical Vapour Deposition. *Carbon*. 2007. № 45. Pp. 55-61. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.carbon.2006.08.013> (last access: 03.04.2023).

14. Andrews R., Jacques D. et al. Continuous Production of Aligned Carbon Nanotubes: A Step Closer to Commercial Production. *Chemical Physics Letters*. 1999. № 303. Pp. 467-474.
15. Bell M. S., Teo K.B.K. and Milne W.I. Factors Determining Properties of Multi-Walled Carbon Nanotubes/ Fibres Deposited by PECVD. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2007. № 40. Pp. 2285-2292.
16. Nolan P. E., Lynch D. C. and Cutler A. H. Carbon Deposition and Hydrocarbon Formation on Group VIII Metal Catalysts. *The Journal of Physical Chemistry*. 1998. В 102. Pp. 4165-4175. URL: <http://dx.doi.org/10.1021/jp980996o> (last access: 04.12.2023).
17. Woo Y. S., Jeon D. Y. et al. In Situ Diagnosis of Chemical Species for the Growth of Carbon Nanotubes in Microwave Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition. *Diamond and Related Materials*. 2002. № 11. Pp. 59-66. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635\(01\)00519-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0925-9635(01)00519-2) (last access: 12.07.2023).
18. Delzeit L., McAninch I. et al. Growth of Multiwall Carbon Nanotubes in an Inductively Coupled Plasma Reactor. *Journal of Applied Physics*. 2002. № 91. 6027. URL: <http://dx.doi.org/10.1063/1.1465101> (last access: 21.09.2023).
19. Меууарпан М. A Review of Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition of Carbon Nanotubes. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2009. №42 (21). DOI:10.1088/0022-3727/42/21/213001.
20. Нанотехнології на залізничному транспорті: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. / Є. М. Лисіков, С. В. Воронін, О. О. Скорик, Д. В. Онопрейчук. Харків: Діса плюс, 2013. 212 с.
21. Лысиков Е. Н. Физические основы механизма воздействия внешнего электростатического поля на структуру рабочей жидкости гидроприводов строительных и дорожных машин. *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета*. Харьков: РИО ХГАДТУ, 2000. Вып. 11. С. 44–47. URL: [http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5638/1/dis\\_Stefanov.pdf](http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/5638/1/dis_Stefanov.pdf) (дата звернення: 10.10.2023).
22. Суранов О. О. Покращення мастильної здатності індустриальних олів шляхом використання продуктів випаровування графіту: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Хар. нац. техн. с.-г. ун-т ім. П. Василенка. Харків: УкрДУЗТ, 2018. 20 с. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP\\_meta&C21COM=S&2\\_S21P03=FILE=&2\\_S21STR=Vkhdtusg\\_2018\\_192\\_38](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=Vkhdtusg_2018_192_38) (дата звернення: 18.10.2023).
23. Войтов В. А., Трошин О. Н., Багров В. А. Математическая модель распределения энергии между элементами трибосистемы в процессе трения и методика расчета. Ч. I. Математическая модель определения скорости работы диссипации в элементах основных трибосистем. *Проблеми трибології*. 2006. № 3 (41). С. 20-28.
24. Воронін С. В. Трибофізичні основи забезпечення мастильної здатності рідкокристалічних присадок до базових олів: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Харків: УкрДУЗТ, 2015. 40 с. URL: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP\\_meta&C21COM=S&2\\_S21P03=FILE=&2\\_S21STR=Vejte\\_2015\\_3\(7\)\\_11](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe?I21DBN=LINK&P21DBN=UJRN&Z21ID=&S21REF=10&S21CNR=20&S21STN=1&S21FMT=ASP_meta&C21COM=S&2_S21P03=FILE=&2_S21STR=Vejte_2015_3(7)_11) (дата звернення: 10.09.2023).
25. Лысиков Е. Н. Теоретические основы интенсификации адсорбционной способности рабочих жидкостей. *Вестник Харьковского государственного автомобильно-дорожного технического университета*. Харьков: РИО ХГАДТУ, 1997. Вып. 6. С. 41–43.
26. Трибологія: підручник / М. В. Кіндрачук, В. Ф. Лабунець, М. І. Пашечко, Є. В. Корбут. Київ: НАУ-друк, 2009. 392 с.

27. Ремарчук М. П. Зменшення тертя в елементах гідросистем мобільних машин на основі теорії рідинного мащення. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков: Технологический центр, 2005. № 3/2(15). С. 28–32.

---

Воронін Сергій Володимирович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Тел.: +38(095)500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Ремарчук Микола Парфенійович, доктор технічних наук, професор кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Тел.: +38 (068) 48-15-320. E-mail: remarchuk@ukr.net

Суранов Олексій Олексійович, кандидат технічних наук, кафедра машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Тел.: +38 (093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Суранов Олексій Владиславович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-7515-8177. Тел.: +38(095)810-69-75. E-mail: lhornet.hneu@kart.edu.ua.

Бабенко Андрій Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри машинобудування та технічного сервісу машин, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Тел.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko\_ngkg@kart.edu.ua.

Voronin Serhii, Dr. Sc. (Tech.), professor, Head of the Department of Mechanical Engineering and Technical Service of Machines, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8443-3222. Tel.: +38 (095) 500-81-59. E-mail: voronin.sergey@ukr.net.

Remarchuk Mykola, Dr. Sc. (Tech.), professor, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4003-5107. Tel.: +38 (068) 48-15-320. E-mail: remarchuk@ukr.net.

Suranov Oleksii O. PhD (Tech.), Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8449-2038. Tel.: +38(093) 69-58-907. E-mail: lhornet.hneu@gmail.com.

Suranov Oleksii V., PhD (Tech.), Associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-7515-8177. Tel.: +38(095) 810-69-75. E-mail: lhornet.hneu@kart.edu.ua.

Babenko Andrii, PhD (Tech.), Associate professor, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6486-468X. Tel.: +38 (097) 000-93-97. E-mail: babenko\_ngkg@kart.edu.ua.

Статтю прийнято 27.11.2023 р.

**УДК 539.216.2:669.35**

## **ОКСИД АЛЮМІНІЮ У ВАКУУМНИХ КОНДЕНСАТАХ НА ОСНОВІ МІДІ**

**Канд. техн. наук Е. В. Зозуля, канд. фіз.-мат. наук І. М. Колупаєв**

## **ALUMINUM OXIDE IN VACUUM CONDENSATES BASED ON COPPER**

**PhD (Tech.) E. Zozulya, PhD (Phys.-Math.) I. Kolupaev**

***Анотація.** Досліджено морфологію частинок оксиду алюмінію у вакуумних дисперсно зміцнених композитах  $Cu-Al_2O_3$ , виготовлених методом електронно-променевого випаровування й одночасного осадження (конденсації) пари компонентів у вакуумі (ЕВ–PVD) залежно від технологічних факторів (температури підкладки та об'ємного вмісту оксиду). Встановлено вплив дисперсності частинок на зміну питомого електроопору композитів  $Cu-Al_2O_3$  при об'ємному вмісті оксиду від 0 до 2 %.*

---



**Ключові слова:** дисперсно зміцнений композит, морфологія частинок оксиду алюмінію, мідна матриця, питомий електроопір.

**Abstract.** Strengthening of copper and copper alloys with aluminum oxide particles is an important technological technique. Composite materials based on copper strengthened with aluminum oxide particles have a significant operating temperature range and better mechanical properties at elevated temperatures than age-hardening alloys. However, at moderate operating temperatures, the use of age-hardening alloys remains more economically justified. The main direction in the development of composites strengthened with oxide particles is the dispersion of the strengthening phase to sizes of several or one nanometer, which will bring their mechanical properties to the level of age-hardening alloys. However, dispersion leads to a significant increase not only in strength, but also in electrical resistance. The adverse effect on the electrical conductivity of dispersed particles will decrease with a decrease in the volume fraction of oxide, bringing the electrical conductivity closer to the level of copper.

Based on an analysis of the materials of scientific research devoted to the production of dispersion-strengthened Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites, it was concluded that the most significant progress in the dispersion of oxide particles with uniform distribution in the copper matrix of the composite was achieved using the method of electron beam evaporation and simultaneous deposition (condensation) of vapors of components in vacuum (EB–PVD).

Structural studies of the morphology of aluminum oxide particles in dispersion-strengthened copper composites were carried out using methods such as: X-ray fluorescence analysis, transmission electron microscopy, and energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDS). The average size of aluminum oxide particles in the studied dispersion-strengthened composites was in the range from 1.8 to 3 nm.

In the work, the dependence of the specific electrical resistance of composites ( $\rho$ ) on the oxide content was investigated. It was found that a decrease in the size of oxide particles leads to an increase in the electrical resistance of the dispersion-strengthened composite.

The studies of the method of electron beam evaporation and subsequent condensation in vacuum, presented in the work, confirm the possibility of further dispersion of aluminum oxide particles with simultaneous narrowing of the distribution histogram. This opens up prospects for further improvement of vacuum dispersion-strengthened copper-based composites.

**Keywords:** dispersion-strengthened composite, morphology of aluminum oxide particles, copper matrix, specific electrical resistance.

**Вступ.** Зміцнення міді та сплавів на її основі частинками оксиду алюмінію є важливим технологічним прийомом. Композитні матеріали на основі міді, зміцнені частинками оксиду алюмінію, відрізняються значним температурним діапазоном експлуатації та кращими механічними властивостями при підвищених температурах порівняно зі старіючими сплавами. Проте при помірних температурах експлуатації застосування старіючих сплавів залишається все ще більш економічно обґрунтованим. Головним напрямом у розвитку дисперсно

зміцнених композитів, зміцнених частинками оксидів, є диспергування зміцнюючої фази до розмірів декількох або навіть одного нанометра, що наблизить їхні механічні властивості до рівня старіючих сплавів. Однак диспергування призводить до суттєвого зростання не тільки міцності, але й електроопору. Неприятливий вплив на електропровідність дисперсних частинок зменшиться при зниженні об'ємного вмісту оксиду, наближаючи електропровідність до рівня міді.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Різноманіття сфер застосування

композитів і сплавів на основі міді в промисловості обумовлює ряд специфічних вимог щодо їхніх властивостей. Окрім основних властивостей (висока електропровідність і висока міцність), до них можуть бути висунені вимоги щодо високої температури рекристалізації, значного опору зносу, пластичності, низького контактного опору, опору знакозмінним навантаженням, доброї здатності до паяння тощо. На всі ці характеристики передусім впливатиме морфологія частинок  $Al_2O_3$  і їхній об'ємний вміст у композиті. Найуживанішою морфологічною характеристикою частинок  $Al_2O_3$  є їхній середній розмір. Найменший середній розмір частинок  $Al_2O_3$  у композитах на основі міді складає від 3 до 5 нм [1-3] і був замірний у композитах, отриманих методами випаровування й одночасного осадження пари компонентів у вакуумі. Для інших, невакуумних, методів одержання дисперсно зміцнених композитів мінімальний розмір частинок знаходиться в межах 10–30 нм [4, 5].

Найменшою частинкою оксиду в дисперсно зміцнених композитах на основі міді теоретично можна вважати молекулу оксиду  $Al_2O_3$ . При використанні методу випаровування й одночасного осадження пари компонентів у вакуумі для створення композита на поверхню росту композита з парою потрапляють молекули  $Al_2O_3$ , які потім захоплюються зростаючою поверхнею конденсату – «замуровуються» [2, 6]. Експериментально молекулярний ступінь дисперсності включень оксиду в мідній матриці не був виявлений, що, імовірно, може бути обумовлено значними методичними обмеженнями при спробах ідентифікації включень оксиду з таким малим розміром.

Серед інших морфологічних особливостей частинок  $Al_2O_3$  у вакуумних композитах передусім відзначимо виявлений рівномірний характер їхнього розподілу в мідній матриці, що збігається з літературними даними [2]. Так само

виявлено, що частинки оксиду мають форму, близьку до рівноосної. При температурі підкладки ( $T_n$ ) нижче 200 °С частинки оксиду в мідній матриці аморфні. З іншого боку, нами раніше [7, 8] досліджувалася структура вакуумних композитів  $Cu-Al_2O_3$ , але точна температура підкладки, вище за яку частинки оксиду зростають кристалічними, ще не встановлена.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи було дослідження впливу частинок оксиду  $Al_2O_3$  на питомий електроопір вакуумних дисперсно зміцнених композитів на основі міді, а також вплив технологічних параметрів методу електронно-променевого випаровування і наступної конденсації у вакуумі на морфологію частинок оксиду в композитах.

**Основна частина дослідження.** Досліджено фольги композитів на основі міді товщиною від 40 до 50 мкм, що містять менше 2 об. %  $Al_2O_3$ , виготовлені методом електронно-променевого осадження у вакуумі, що містять як другу фазу частинки  $Cu-Al_2O_3$ . Крім того, досліджували мідь, одержану в аналогічних умовах.

Вимірювання вмісту оксиду проводилося за допомогою рентгенофлуоресцентного аналізу, що традиційно здійснюється за калібрувальними графіками металу, а кількість оксиду отримують розрахунковим шляхом. На рис. 1, а наведений спектр сканування композита, на якому спостерігається розподіл ліній  $K_\alpha$  та  $K_\beta$ . На рис. 1, б, як приклад, наведено в збільшеному вигляді порівнювані спектри плівок композита і міді в діапазоні 1,35–1,65 Å. При порівнянні спектрів, знятих в однаковій геометрії на вакуумному спектрометрі, значних відмінностей виявлено не було. Труднощі вимірювання вмісту легких елементів є загальновідомими, зокрема алюмінію пов'язані з украй низьким рівнем аналітичного сигналу (рис. 1, в).

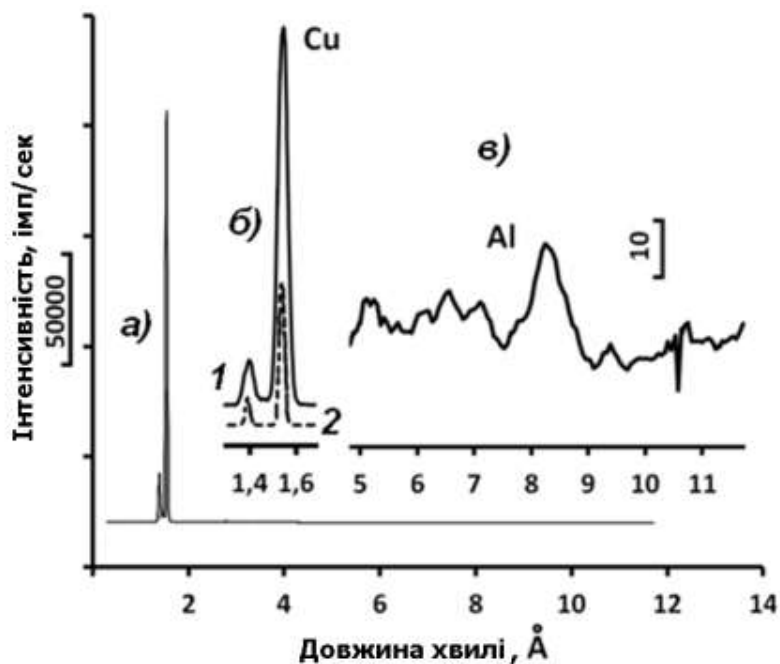


Рис. 1. Рентгенівський спектр сканування композита: а – загальний вигляд; б – збільшений фрагмент спектра плівки в області лінії міді: 1 – композита 0,3 % ваг. Al; 2 – міді; в – частина спектра композита у довгохвильовій області

Прецизійні рентгендіфрактометричні дослідження напруженого стану композитів виконували  $\sin^2\psi$ -методом (похибка визначення періоду решітки не гірше  $\pm 10^{-5}$  нм). При цьому враховували всі фактори, які призводять до зсуву дифракційних ліній і, отже, виділяли ефекти, пов'язані з розчинністю елементів у кристалічній

решітці міді. Одержані  $\sin^2\psi$ -методом дані за періодом решітки виявилися порівнянні з літературними даними для міді. Результати за періодом решітки наведені в таблиці. Незначне зниження параметра решітки в плівках порівняно з металургійною міддю спостерігалось й іншими дослідниками і пояснювалось впливом вакансій.

Таблиця

Результати дослідження періоду решітки вакуумних композитів Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Матеріал	Період решітки, Å / (лінія)
Мідна плівка	3,6154/ (311)
	3,6130/ (222)
Композит Cu–1,4 % об. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,6085/ (311)
	3,6130/ (222)
Довідкове значення	3,6148

Встановлено, що композит має двофазну структуру, яка складається з мідної матриці і рівномірно розподілених у ній нанодисперсних частинок Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Вплив

вмісту оксиду в композиті, отриманому при температурі підкладки нижче 200 °С, на середній розмір частинок ( $d_n$ ) показано на рис. 2.

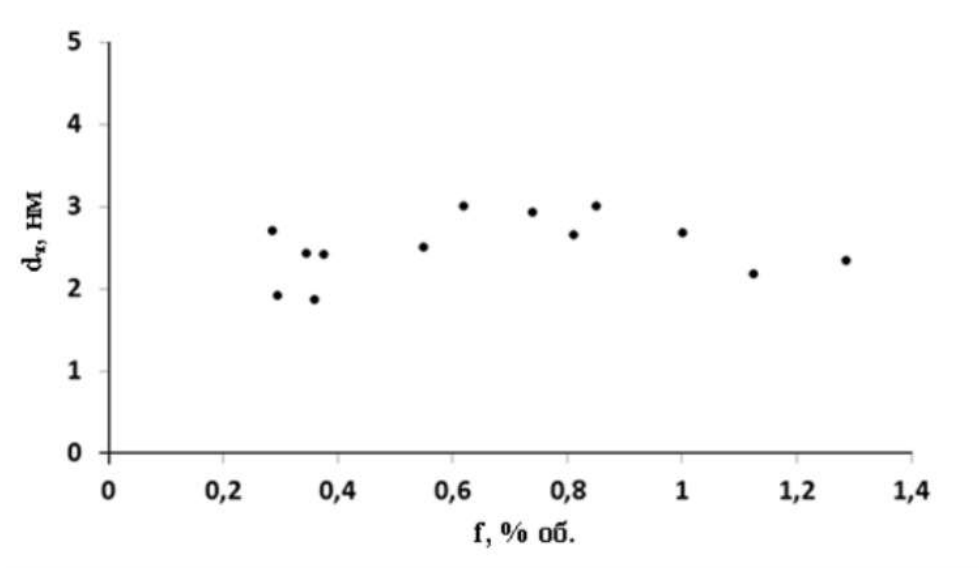


Рис. 2. Вплив вмісту зміцнюючої фази ( $f$ ) на середній розмір частинок для композита  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$  ( $T_n < 200$  °С)

Як бачимо, вміст  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $f$ ) істотно не впливає на  $d_n$ , що співпадає з літературними даними. Відповідно зі зростанням  $f$  збільшується об'ємна щільність частинок і зменшується відстань між ними.

При цьому питомий електроопір композита  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ , виміряний за температури 20 °С, істотно зростає зі збільшенням вмісту оксиду (рис. 3). Зіставлення гістограм розподілу розмірів частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  не показало значних розбіжностей; це підтверджує, що підвищення питомого електроопору обумовлене в першу чергу зростанням об'ємної щільності частинок.

Відомо, що в міді елементи структури за збільшення величини внеску в електроопір розташовують у такому порядку: границі зерен; дислокації; точкові дефекти. Екстраполяція значень питомого електроопору ( $\rho$ ) композитів (пунктирна лінія на рис. 3) на нульовий вміст оксиду дає величину  $\sim 1,66 \times 10^{-8}$  Ом·м, що задовільно узгоджується з експериментальними оцінками, отриманими для міді. Ця величина може

слугувати оцінкою сумарного внеску вакансій, дислокацій і границь зерен матриці в електроопір композита. З урахуванням результатів за рентгеноструктурним аналізом для композита це може свідчити про те, що основний внесок обумовлений саме частинками  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Для композитів  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ , отриманих за температури підкладки вище 350 °С, концентраційна залежність питомого опору, зображена на рис. 4, інша і має немонотонний характер. Такий, якісно протилежний до даних на рис. 3, вигляд залежності питомого електроопору від вмісту частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  можна пояснити виходячи з позицій зміни морфології частинок  $\text{Al}_2\text{O}_3$  при зменшенні щільності молекул оксиду  $\text{Al}_2\text{O}_3$  на поверхні росту.

Композити  $\text{Cu-Al}_2\text{O}_3$ , отримані за температури підкладки вище 350 °С, мають мультимодальну гістограму розподілу частинок [8], на відміну від композитів, отриманих за температури підкладки нижче 200 °С. Проаналізуємо отримані дані, спираючись на загальновідомі дані щодо механізмів росту.

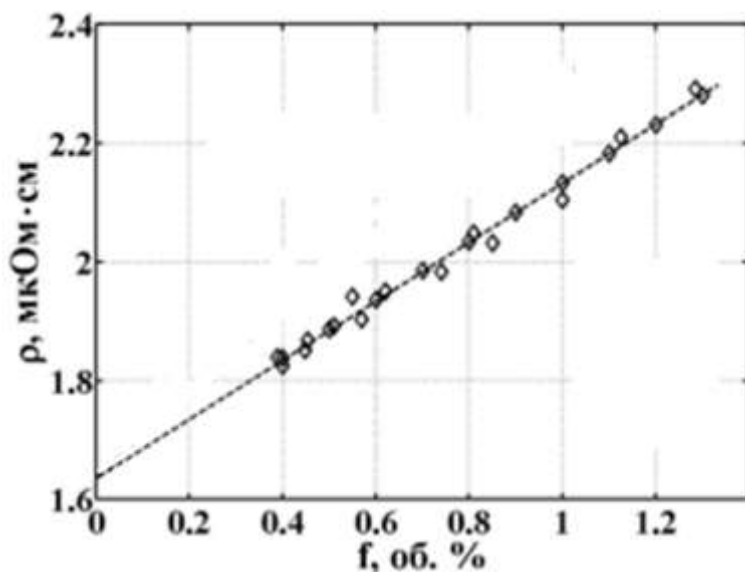


Рис. 3. Питомий електроопір дисперсно зміцнених композитів Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> залежно від вмісту оксиду ( $T_n < 200$  °C): пунктирна лінія – лінійна регресія експериментальних даних

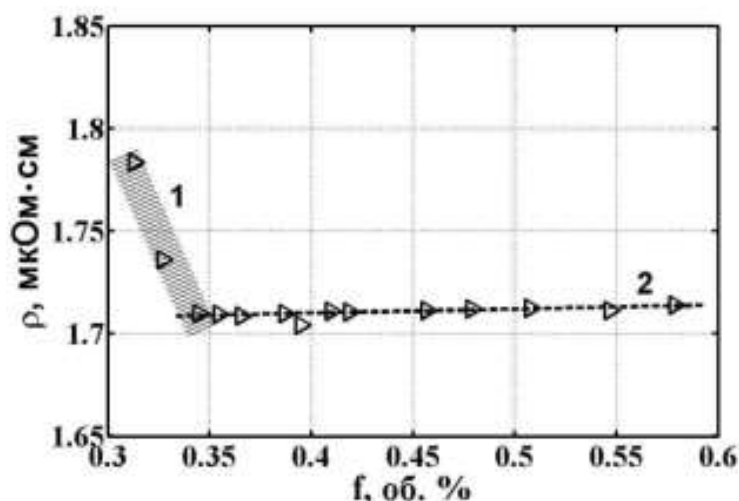


Рис. 4. Питомий електроопір дисперсно зміцнених композитів Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> залежно від вмісту оксиду ( $T_n > 350$  °C): 1, 2 – лінійна регресія експериментальних даних

З підвищенням температури  $T_n$  зростає швидкість пересування молекул Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> по поверхні росту, а також і площа, з якої вони можуть поступати до зростаючого острівця. Це призводить до розширення гістограми розподілу частинок в область більших розмірів частинок. Розмір частинок збільшується, і при

однаковому вмісті оксиду Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для композитів, отриманих за більшої температури підкладки, питомий опір буде нижче [7]. Водночас при зростанні частинок відбувається і їхнє «замуровування» атомами міді, що також поступають на поверхню росту. Отже, частинки віддаляються від поверхні росту

«заглиблюючись» у мідь. Імовірність «заглиблення» острівців  $Al_2O_3$  з меншим розміром зростає при зменшенні щільності молекул оксиду  $Al_2O_3$  на поверхні росту. Частинки оксиду не встигають стати більшими (кінетичний фактор), як їх «замуровують» атоми міді. При цьому найбільш імовірний діаметр (максимум на гістограмі) частинок  $Al_2O_3$  зміщується в бік менших розмірів. Як наслідок, питомий електроопір композитів зростає (лінія 1 на рис. 4) і виявляється порівняним зі значеннями питомого електроопору композита, отриманого за більш низької температури підкладки.

Підвищення вмісту  $Al_2O_3$  призводить до збільшення щільності молекул оксиду  $Al_2O_3$  на поверхні росту і відповідно швидкості зростання частинок  $Al_2O_3$ . Зростає частка великих частинок, і питомий електроопір знижується. За подальшого підвищення вмісту  $Al_2O_3$  падіння значень  $\rho$  змінюється їхнім слабким зростанням (лінія 2 на рис. 4). Останнє обумовлене підвищенням концентрації переважно порівняно великих частинок  $Al_2O_3$ . За якістю це узгоджується з раніше отриманими даними [7] щодо зниження швидкості зростання питомого опору з підвищенням  $T_n$ .

**Висновки.** Електроопір вакуумних дисперсно зміцнених композитів адитивно пов'язано зі вмістом частинок оксиду певної дисперсності. Оцінки параметрів гістограм розподілу частинок за розмірами для певної  $T_n$  показують їхню стійкість за зміни вмісту оксиду в дослідженому інтервалі концентрацій, відсутності обмежень на зростання частинок. Це призводить до спостережуваної лінійної залежності питомого опору від вмісту  $Al_2O_3$ .

Відповідно зі зростанням вмісту оксиду зростає об'ємна щільність частинок і зменшується відстань між ними. З підвищенням температури підкладки зростає дисперсія розподілу частинок, гістограма стає ширшою також за рахунок утворення більш дисперсних частинок оксиду.

Дослідження методу електронно-променевого випаровування і наступної конденсації у вакуумі, виконані в роботі, показали можливість подальшого диспергування частинок  $Al_2O_3$  за одночасного звуження гістограми розподілу, що підтверджує перспективи подальшого вдосконалення вакуумних дисперсно зміцнених мідних композитів.

### Список використаних джерел

1. Majumder K. S. Synthesis and structural characterization of copper-alumina composites prepared by high rate physical vapor deposition. *Thin Solid Films*. May 1977. Vol. 42, Is. 3. P. 327–341.
2. Ильинский А. И. Структура и прочность слоистых и дисперсноупрочненных пленок. Москва: Металлургия, 1986. 144 с.
3. Структура конденсированных дисперсноупрочненных композиций на основе никеля и меди / П. А. Панчева, А. И. Ильинский, И. А. Савченко и др. *Металлофизика*. 1980. Т. 2, № 2. С. 112–120.
4. Jena P. K., Brocchi E. A., Motta M. S. In-situ formation of Cu– $Al_2O_3$  nano-scale composites by chemical routes and studies on their microstructures. *Materials Science and Engineering*. 2001. A313. P. 180–186.
5. Rezayat, Mohammad et al. Characterization and optimization of Cu- $Al_2O_3$  nanocomposites synthesized via high energy planetary milling: a morphological and structural study. *Journal of Composites Science*. 7.7 (2023): 300.

6. Структура и прочность легированных тугоплавким оксидом микрокристаллических вакуумных конденсатов меди / В. М. Шулаев, В. С. Коган, А. И. Ильинский и др. *Вісник СумДУ*. Суми: СумДУ, 2002. № 13(46). С. 125–132.

7. Zozulya E. V., P'inskii A. I. and Kolupaev I. N. Structure and electrical resistance of dispersion-strengthened vacuum-deposited Cu–Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanocomposites. *The Physics of Metals and Metallography*. 111 (2011): 155-157.

8. Влияние состава и условий осаждения на структуру и свойства вакуумных композитов на основе меди, упрочненных оксидом алюминия / Е. В. Зозуля и др. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. Серія: *Механіко-технологічні системи та комплекси*. 4 (2016): 10-15.

---

Зозуля Едуард Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0003-4598-8182.

Тел.: +38 (057) 707-64-35. E-mail: zozulya.ev@gmail.com.

Колупаєв Ігор Миколайович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0002-2125-7118. E-mail: igor.kolupaev@gmail.com.

Zozulya Eduard, PhD(Tech). Associate Professor, department of materials science, NTU «KhPI».

ORCID iD: 0000-0003-4598-8182. Тел.: +38 (057) 707-64-35. E-mail: zozulya.ev@gmail.com.

Kolupaev Igor, PhD(Phys.-Math.). Associate Professor, department of materials science, NTU «KhPI».

ORCID iD: 0000-0002-2125-7118. E-mail: igor.kolupaev@gmail.com.

Статтю прийнято 10.12.2023 р.

УДК 539.216.2:669.35

## НІОБІЙ У МІДІ ТА СПЛАВАХ НА ЇЇ ОСНОВІ. ОГЛЯД

Канд. техн. наук Е. В. Зозуля, кандидати фіз.-мат. наук А. І. Зубков, О. С. Терлецький, асп. В. А. Рябоштан

## NIOBIUM IN COPPER AND COPPER-BASED ALLOYS. REVIEW

PhD (Tech.) E. Zozulya, PhD (Phys.-Math.) A. Zubkov,  
PhD (Phys.-Math.) A. Terletskiy, postgraduate student V. A. Riaboshtan

*Анотація.* У науково-технічному літературному огляді досліджено використання ніобію як екологічно безпечної та ефективної легуючої добавки для підвищення температурної стабільності структури і властивостей мідних виробів з ультрадрібнистою зеренною структурою. Значна увага приділена потенціалу ніобію як легуючої добавки в контексті інноваційного використання ніобію для утворення особливого «шару» на межах зерен з метою посилення його впливу на структуру, особливо зеренну, і відповідно властивості міді та матеріалів на її основі.

Огляд літературних та інформаційних джерел, присвячених фазовій діаграмі Cu-Nb, показав, що ніобій є одним з найбільш сильнодіючих сегрегантів для обмеження зростання зерен у бінарних сплавах на основі міді. Крім того, розглянуто ефективність ніобію як

легуючого елемента, що покращує зеренну структуру, і механізми, що, як вважається, лежать в основі цього явища. Зокрема, було розглянуто використання легування і технологій і методів обробки рідкого металу для подрібнення зеренної структури сплавів міді.

З'ясовано, що ніобій у сплавах на мідній основі використовується також для поліпшення фізико-механічних і технологічних властивостей. Висвітлено вплив мікродомішок на кінцеву структуру сплаву мідь-ніобій, що стосується певних вимог до чистоти вхідних використовуваних матеріалів і технологій, з метою усунення забруднення розплаву та поліпшення його гомогенізації.

В огляді стисло розглянуто й інші методи, які можна використати для утворення особливого «шару» на межах зерен. Зокрема, було вивчено технології механічного легування та методи одночасного осадження пари компонентів сплаву у вакуумі. На підставі результатів літературного аналізу показана значна перспективність методів одночасного осадження пари компонентів сплаву у вакуумі для створення особливого «шару» на межах зерен.

У статті розглянуто результати досліджень сегрегації ніобію на границях зерен системи мідь-ніобій та інших подібних систем, внаслідок чого встановлено, що вдосконалення низки описаних технологій і методів можуть бути досить перспективними для подальшого розроблення технології з метою впровадження її у виробництво.

**Ключові слова:** мідь, сплави міді, мідь-ніобій, ультрадрібниста зеренна структура, термостійкість.

**Abstract.** In the scientific and technical literature review, investigated the use of niobium as an environmentally friendly and effective alloying addition to enhance the temperature stability of the structure and properties of copper products with an ultrafine-grained structure has been investigated. Considerable attention is paid to the potential of niobium as an alloying addition in the context of the innovative use of niobium to form a special «layer» at grain boundaries to strengthen its influence on the structure, especially the grain structure, and consequently on the properties of copper and materials based on it.

The review of literature and informational sources devoted to the Cu-Nb phase diagram has shown that niobium is one of the most effective segregants to limit grain growth in binary copper-based alloys. Additionally, the efficiency of niobium as an alloying element that improves the grain structure and the mechanisms believed to underlie this phenomenon have been discussed. In particular, the use of alloying and liquid metal processing technologies for refining the grain structure of copper alloys has been examined.

It has been elucidated that niobium in copper-based alloys is also used to enhance physical-mechanical and technological properties. The impact of microimpurities on the final structure of the copper-niobium alloy has been highlighted, imposing specific requirements on the purity of input materials and the technologies used to eliminate contamination from the melt and improve its homogenization.

The review briefly discusses other methods that can be employed to form a special «layer» at grain boundaries. Specifically, technologies of mechanical alloying and methods of simultaneous deposition of component vapors in a vacuum have been studied. Based on the results of the literature analysis, the considerable prospectiveness of methods involving the simultaneous deposition of component vapors in a vacuum to create a special «layer» at grain boundaries has been demonstrated.

The article examines the results of studies on niobium segregation at grain boundaries in the copper-niobium system and similar systems, establishing that the improvement of several described



*technologies and methods can be quite promising for the further development of technology for its implementation in production.*

**Keywords:** *copper, copper alloys, copper-niobium, ultrafine-grained structure, thermal stability.*

**Вступ.** Широке використання міді в приладах та обладнанні обумовлене її електро- і теплопровідниковими властивостями, корозійною стійкістю і пластичністю. Для виробів із міді характерною проблемою є підвищення міцності та збільшення температури експлуатації при збереженні електро- і теплопровідності, пластичності і корозійної стійкості на рівні чистого металу. Проблема застосування мідних виробів у високотемпературних середовищах і під різного виду навантаженнями є стимулом для численних експериментальних і теоретичних досліджень. Одним з напрямів, націлених на вирішення цієї проблеми, є пошук матеріалів, що можуть бути додані до міді та є безпечними, наприклад замість берилію або кадмію, і за рахунок технологій їхнього введення розподілені у вигляді «шару» по границях зерен.

**Визначення мети та завдання огляду.** Мета науково-технічного літературного огляду полягає в систематизації та аналізі науково-технічних джерел, присвячених використанню ніобію в міді та сплавах на її основі. Огляд спрямований на визначення потенціалу ніобію як легуючої добавки для підвищення температурної стабільності структури та властивостей мідних виробів з ультрадрібнистою зеренною структурою.

**Основна частина дослідження.**

**1. Сплави мідь-ніобій.** Початок дослідження сплавів мідь-ніобій можна віднести до 1940-х років, коли авторами роботи [1] було досліджено вплив малих добавок ніобію на температуру пом'якшення холоднокатаної міді. Було встановлено, що близько 0,1 pct (% wag) Nb у міді потрібно для помітного ефекту підвищення температури пом'якшення. Додавання ж 0,58 pct (% wag) Nb підвищило

температуру пом'якшення до приблизно 450 °C порівняно з приблизно 250 °C для міді.

Наприкінці 1950-х років з'являються перші дослідження фазової діаграми системи Cu-Nb. Дослідження, направлені на уточнення діаграми, проводяться й до сьогодні.

У 1960-х роках експериментально було встановлено, що якщо мідь високої чистоти розплавити в тиглі з ніобію в атмосфері гелію, то отриманий зливоч проявляє надпровідність при температурах від 6 до 8 K [2]. Це розширило сферу застосування сплавів системи Cu-Nb і стало ще одним стимулом для її подальшого вивчення.

Важливим поштовхом для розвитку досліджень цієї системи в наш час стала проблема, пов'язана з впровадженням нанокристалічних матеріалів, що характеризуються поєднанням унікальних властивостей. Так, молекулярно-динамічне моделювання, зроблене в роботі [3], показало, що після легування до 1,9 % ат. Nb міцність нанокристалічної Cu може наблизитися до значень теоретичної міцності для ідеального монокристала. На противагу теоретичним розрахункам, кращі експериментальні досягнення на сьогодні для нанокристалічної Cu, наведені в роботі [4], – це поки що  $\sigma_v \approx 1100$  МПа і  $\delta \approx 56$  % відповідно. Отже, нанокристалічна мідь може поєднати такі властивості, як міцність, пластичність і тепло- та електропровідність. Її впровадження, як і інших нанокристалічних матеріалів, гальмується термічною нестабільністю структури та відповідно властивостей, навіть при кімнатній температурі. Ніобій, як легуючий елемент, відіграє важливу роль як сповільнювач росту зерна та допомагає контролювати однорідність зерна в

мікроструктурі різних композитів, що містять ніобій [5, 6], і може сприяти стабілізації границь зерен нанокристалічної міді.

Отже, сьогодні система Cu-Nb інтенсивно досліджується [7-12] і є

актуальною як з наукового, так і комерційного погляду.

**2. Властивості міді та ніобію.** У таблиці наведені характерні фізичні властивості міді та ніобію.

Таблиця

Властивості міді та ніобію [13]

Властивість	Елемент	
	мідь (Cu)	ніобій (Nb)
Кристалічна ґратка	FCC	BCC
Температура плавлення	1356,6 К	2741 К
Густина	8,96 г/см <sup>3</sup>	8.57 г/см <sup>3</sup>
Молярна теплоємність	24.440 Дж/(К·моль)	24.60 Дж/(К·моль)
Лінійний коефіцієнт розширення	$16.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$	$7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Питомий електроопір	$16.78 \times 10^{-9} (25 \text{ }^\circ\text{C})$	$15,24 \times 10^{-8} \text{ Ом}\cdot\text{м} (0^\circ\text{C})$
Модуль Юнга	110-128 ГПа	105 ГПа
Модуль зсуву	48 ГПа	38 ГПа
Об'ємний модуль	140 ГПа	170 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0.34	0.40
Твердість, за Віккерсом	343-369 МПа	870-1320 МПа

Мідь як конструкційний матеріал характеризує висока тепло- та електропровідність, пластичність і корозійна стійкість. У розчинах лугів і аміаку, хлорводневої кислоти вона достатньо стійка за відсутності інших окиснювачів і контакту, зокрема з повітрям. Мідь не утворює міцних захисних оксидних плівок, тому нестійка до окиснення.

Мідь здатна зберігати ударну в'язкість при низьких температурах, що робить її прийнятним матеріалом для виготовлення криогенної і теплообмінної апаратури. Вироби з міді можуть експлуатуватись в інтервалі температур від 25 до 500 К.

До недоліків міді відносять низькі ливарні властивості і погану оброблюваність різанням.

Ніобій, також відомий у деяких країнах як колумбій, з чистотою 99,4 % і більше – високопластичний метал, який становить інтерес через його добру

корозійну стійкість, термічні властивості, високотемпературну міцність. Серед тугоплавких металів ніобій має найменшу роботу виходу електронів. Ніобій є надпровідним металом і серед інших елементів характеризується найвищою критичною температурою переходу в стан надпровідності (9,17 К). Однак критичні напруженості магнітного поля в ніобію недостатні для його широкого застосування. Ніобій стійкий до впливу кислого середовища. При температурах понад 250 °С ніобій починає активно окиснюватися киснем, а також вступати в хімічні реакції з молекулами водню і азоту. Ніобій має високу газопоглинальну здатність в інтервалі температур 400–900 °С. В електровакуумних приладах конструктивні деталі з ніобію одночасно виконують функції гетера. Ніобій має високу спорідненість до кисню, азоту і

вуглецю, тому утворює оксиди, нітриди, оксонітриди, карбіди чи карбонітриди.

Ніобій стійкий до ряду розплавів металів, таких як Ag, Bi, Cd, Cs, Cu, Ga, Hg, K, Li, Mg, Na і Pb, якщо ці розплави містять мало кисню.

Близькі механічні властивості дають змогу спільно деформувати мідь і ніобій, отримуючи волокнисті та багаточастинні композиційні матеріали.

**3. Діаграма стану системи мідь-ніобій.** Фазова діаграма системи Cu-Nb з чистими складовими (без кисню, азоту, сірки та вуглецю) за даними роботи [14] показана на рис. 1, а на рис. 2 [15] показана частина діаграми з малими концентраціями

ніобію. Фазами рівноваги є (L) рідина; (Cu) твердий розчин на основі Cu з обмеженою розчинністю Nb, що має гранецентровану кубічну кристалічну ґратку; (Nb) твердий розчин; на основі Nb з обмеженою розчинністю Cu, що має об'ємноцентровану кубічну кристалічну ґратку. Ця діаграма вибрана виходячи з дискусії щодо уточнення діаграми системи Cu-Nb [16, 17]. Для цієї системи характерним є вплив мікродомішок, що є домішками з вхідних матеріалів і/або долучених під час обробки, на співіснуючі фази та їхню відносну стабільність, що ускладнює роботу з визначення точок діаграми.

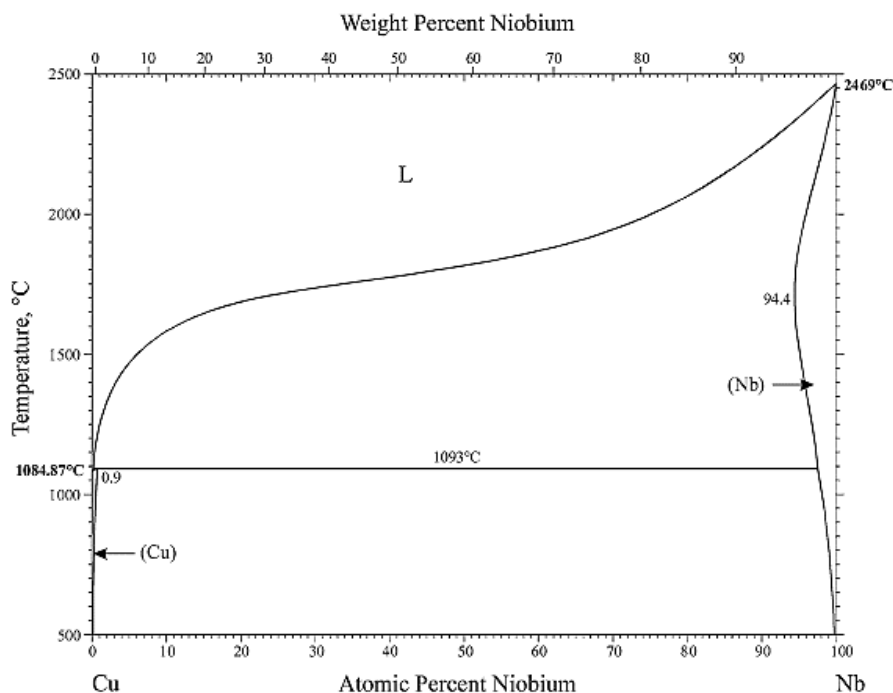


Рис. 1. Фазова діаграма системи Cu-Nb [14]

Як відомо, при перитектичній реакції (Cu)-кристали можуть зароджуватися на поверхні (Nb)-кристалів, оточуючи їх суцільними обідками фази, що утворюється. Така структура отримала назву «структура оточення». Отримання такої структури у сплаві Cu-Nb, як відомо, є доцільним при подальшому виготовленні

надпровідних дротів. Ніобій у роботі [18], за розрахунком, названо найбільш сильнодіючим сегрегантом для обмеження зростання зерен у бінарних сплавах на мідній основі. Тим не менш, як зазначається в роботі, слід також урахувувати максимальну концентрацію 0,9 % ат. Nb у твердому розчині (рис. 2), а

отже, граничну потенцію обмеження росту зерен. Щодо останнього, то збагачення границь зерен ніобієм для їхньої

стабілізації, коли частина Nb вже присутня у вигляді виділень, потребує подальшого вивчення.

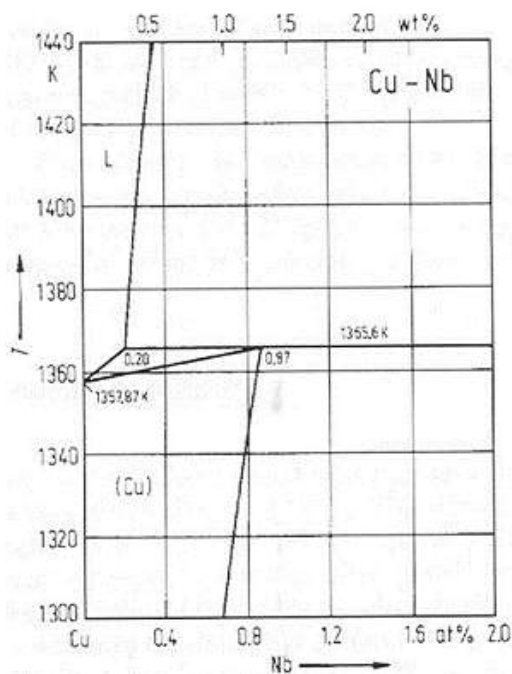


Рис. 2. Фазова діаграма системи Cu-Nb, бік міді [15]

Металографічні дослідження, наведені в роботі [19], свідчать, що в сплавах Cu-Nb у матриці Cu присутні два різних типи частинок ніобію. Одні частинки з середнім розміром 10 мкм випадково розподілені в сплаві. Вони, як допускають автори, утворюються при високій температурі, коли основна маса сплаву все ще перебуває в рідкому стані. Інші частинки Nb з розміром до 2 мкм, імовірно, виділяються після кристалізації. Наголошувалося, що великі виділення більш поширені в сплавах, що містять більше 1,5 % ат. Nb.

У роботі [11] також було виявлено два типи частинок – дендрити, багаті ніобієм, з розміром близько декількох мікрон і дрібні частинки розміром близько сотень нанометрів, розміщені на границях зерна мідної матриці. Автори роботи [20] відзначили тенденцію частинок ніобію до

утворення кластерів. Для запобігання цьому вони рекомендували використовувати перемішування. Дослідження в роботі [15] показали вплив на морфологію виділень, багатих ніобієм, кисню: дендрити заміщуються сфероїдами.

Отже, отримання якісних відливків сплавів системи Cu-Nb все ще є досить складним, бо потребує: а) чистих вхідних матеріалів та усунення забруднення розплаву; б) застосування певних технологій для гомогенізації розплаву з метою отримання рівномірного розподілення виділень у матриці.

**4. Ніобій як добавка до міді та сплавів на основі міді.** При додаванні до міді ніобію, як і Be, V, Mg, Al, Ca, Mn, Y, Zr, U, Li та La, дає змогу вирішити проблеми, пов'язані з пластичністю при підвищених температурах, але в менше, ніж P або Ti [21].

Ніобій також збільшує червоностійкість міді [22]. Nb, як Ti і V, – це «класичний» елемент для мікролегуння сплавів, що піддаються термомеханічній обробці.

У роботі [1] початку 1940-х років досліджено вплив добавок ніобію (у статті – колумбію) ~ 0,1 та ~ 0,58 % ваг. або відповідно ~ 0,08 та 0,4 % ат. на температуру пом'якшення ( $T_{SF}$ ). У статті також наведені дані для міді. Для добавки ~ 0,08 % ат. ніобію не зафіксовано її впливу на температуру пом'якшення, але відзначається її вплив на твердість після відпалу, яка вища, ніж у міді. Визначена температура пом'якшення міді в цій роботі – 250 °C або ~ 523 K. Добавка 0,4 % ат. ніобію до міді призвела до збільшення температури пом'якшення ( $T_{SF}$ ) до 450 °C (723 K).

Відомо, що домішки в міді впливають на процеси, що відбуваються при рекристалізації. Загалом це спостерігається з підвищенням температури рекристалізації або, наприклад, температури пом'якшення ( $T_{SF}$ ). У міді без домішок температура рекристалізації близька до кімнатної [23], а температура пом'якшення, як відомо, менше температури рекристалізації.

На початку 1980-х років у роботах [24–27] були виконані аналогічні дослідження з впливу на температуру пом'якшення міді малих добавок інших легуючих елементів (вплив ніобію не вивчався). Температура пом'якшення доступної на той час комерційної міді складала вже ~ 375 K (~ 102 °C). Було встановлено, що добавка легуючого елемента в кількості ~ 0,001 % ат. вже призводить до зміни температури пом'якшення. Аналогічна характеристика – температура напівпом'якшення ( $T_H$ ) холодно деформованої міді з концентрацією легуючих елементів ~ 0,001 – 0,003 % ат. ставала зазвичай нижчою, ніж у чистій міді. Це було пояснено зменшенням кількості домішок сірки, розчиненої в чистій міді,

при утворенні сульфідів легуючими елементами, оскільки мідь, що містить сірки менше 0,0001 % ат., легко перекристалізувалася при температурі 303 K. Було також зазначено, що лише 0,0017 % ат. Zr або Hf призводить до зростання температури напівпом'якшення ( $T_H$ ) до 820 K. Температура пом'якшення ( $T_{SF}$ ) при цьому для міді, легованої такою кількістю Zr, склала 725 K. Ця температура знаходиться на рівні з температурою, встановленою для системи Cu- 0,4 % ат. Nb в роботі [1], де використовувалася менш чиста мідь. Дані цих робіт є підставою для висунування певних вимог до чистоти матеріалів і «чистоти» технологічних процесів, задіяних при виробництві таких сплавів.

Ніобій використовується також як добавка до мідно-нікелевих сплавів. Ніобій утворює фази  $Ni_3Nb$  і  $Ni_8Nb$  у сплавах системи Cu-Ni, роблячи мідно-нікелеві сплави дисперсійно-твердіючими [28]. Крім того, як встановлено в роботі, коефіцієнт теплопровідності сплаву Cu-Ni-Nb збільшується з підвищенням вмісту Nb. Також у практиці зустрічається введення ніобію для поліпшення зварюваності, як приклад можна навести CuNi30Fe1NbSi-C.

При дослідженні сплавів системи Cu-Nb з більшим вмістом ніобію [29] було виявлено відхилення твердості, за Роквеллом, від оцінки твердості сплавів на основі правила сумішей в області 15–20 % ваг. (рис. 3). Автори роботи [30] також відзначили аномальне збільшення міцності, яке відбувалося при підвищенні вмісту ніобію з 10 до 20 об. % Nb. Проаналізувавши дані роботи [31], що поріг перколяції для кубічних структур становить близько 15 %, було зроблено припущення, що не менше 15 % об. (~10 % ат.) Nb потрібно в системі Cu-Nb для отримання взаємозв'язку між виділеннями Nb у сплавах. Ця величина залежить також від рівномірності розподілу ніобію в зливку.

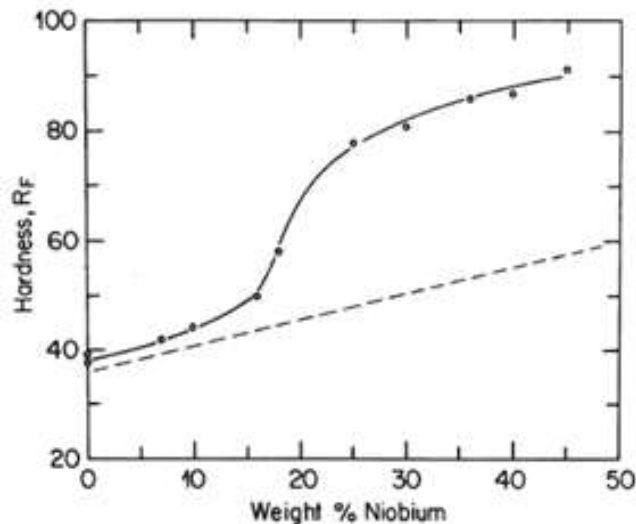


Рис. 3. Вплив вмісту ніобію на твердість, за Роквелом, сплавів Cu-Nb [29].  
Пунктирна лінія – оцінка твердості сплавів на основі правила сумішей

**5. Подрібнення зерна міді.** Взагалі зменшення розміру зерна міді та сплавів міді добавками, як і сплавів на основі інших металів, не практикується як окремо взятий етап технологічної обробки рідкого металу сам по собі, оскільки певний ступінь подрібнення досягається лише комплексом заходів при всьому процесі отримання зливка [32]. Подрібнення зерна в міді та мідних сплавах, як і сплавах на основі інших металів, може бути досягнуто за рахунок швидкого охолодження, механічної вібрації або додавання речовин, що впливають на зародження або зростання зерен (рис. 4). З технологіями подрібнення зерна можна ознайомитися в оглядах [33, 34]. Подрібнення розміру зерна міді при додаванні малої кількості легуючого елемента в розплав міді відоме більше 80 років, але механізм подрібнення все ще не до кінця зрозумілий.

Вплив на розмір зерна міді незначних добавок (до 0,5 % ваг.) легуючих елементів досліджувався в роботах [18, 24, 35–37]. Спостерігалось як подрібнення зерна, так і його збільшення (рис. 5). Як видно з рисунка, не зафіксовано впливу ніобію на розмір зерна при вибраній авторами технологічній схемі отримання зливоків.

З огляду літератури випливає, що механізми подрібнення зерна в сплавах на основі міді не дуже добре вивчені. Відсутність розуміння поширюється на взаємодію між добавкою, що подрібнює зерно, і домішками, що присутні в міді.

**6. Дослідження сегрегації ніобію на границях зерен.** Дослідження сегрегацій ніобію на границях зерен у системі Cu-Nb, що виконано в роботі [38], може слугувати прикладом сучасних нечисленних експериментальних досліджень зернограничних сегрегацій, створених з метою стабілізації розмірів нанозерен. Дослідження стоїть в ряду інших досліджень цієї наукової групи [39–42], направлених на створення стабільних під термічним впливом нанозерених матеріалів на мідній основі і не тільки. Першою в цій серії досліджень можна вважати роботу, виконану на системі Cu-Zr [4, 39], отриману з використанням методу механічного легування, де в результаті створення аморфної міжзеренної плівки (amorphous intergranular films) вдалося досягнути термічної стабільності структури, високої міцності та зберегти пластичність чистої міді.

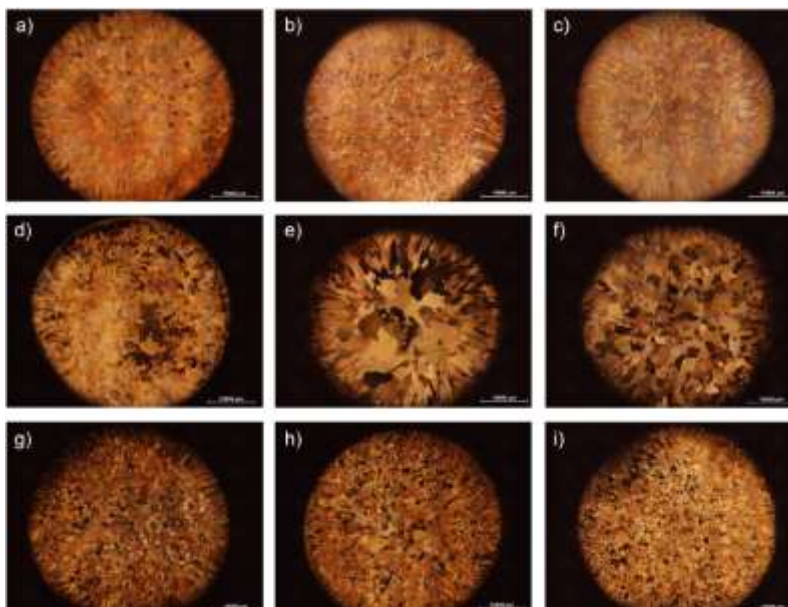


Рис. 4. Макрофотографії бінарних сплавів Cu з добавкою [18]:  
 0,05 (a), 0,1 (b) і 0,5 (c) % ваг. P;  
 0,05 (d), 0,5 (e) і 1 (f) % ваг. Zr;  
 0,05(g), 0,2 (h) і 1 (i) % ваг. Ni

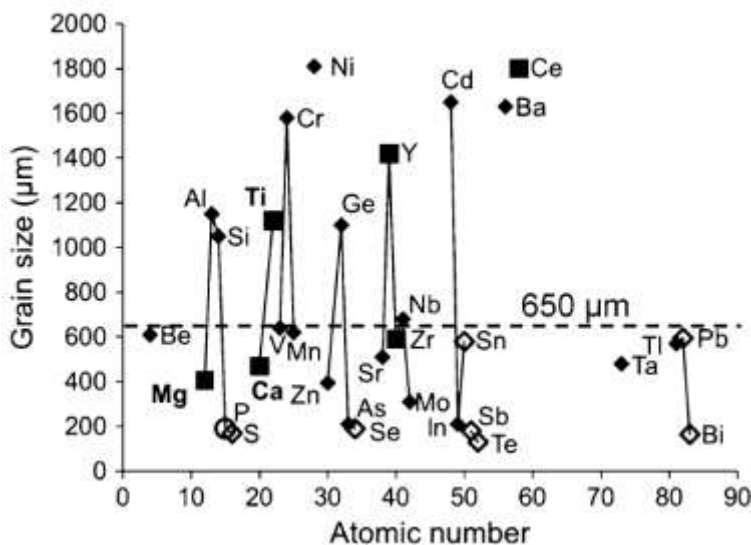


Рис. 5. Зміна розміру зерна міді при додаванні 0,1 % ваг. легуючого елемента в розплав міді в атмосфері Ar (незаповнені символи – елементи, що викликають ефект окрихчення границь зерен міді; заповнені символи – елементи, що протидіють окрихченню границь; пунктирна лінія – розмір зерна міді) [37]

Дослідження [38], пов'язане з переходом від порошоків до плівок, отриманих спільним напиленням міді та легуючого елемента магнетронами, є новим

етапом у роботі цієї наукової групи. Відбулося і розширення систем дослідження. Тепер це Cu-Nb, Cu-Mo, Cu-Hf і Cu-Zr. У плівках систем Cu-Hf і Cu-Zr

авторам вдалося отримати аморфну міжзеренну плівку, а в системах Cu-Nb і Cu-Mo ще ні. У системах Cu-Nb (рис. 6) і Cu-Mo створено леговані, атомногострі та впорядковані границі зерен. Кластери на границях зерен виявлені як у системі

Cu-Nb, так і системі Cu-Mo. Середній розмір кластерів 30 і 5 нм відповідно. Можливо, через значно більший розмір кластера тільки система Cu-Nb показала незадовільну термічну стабільність при температурі  $0,9 T_{пл}$ .

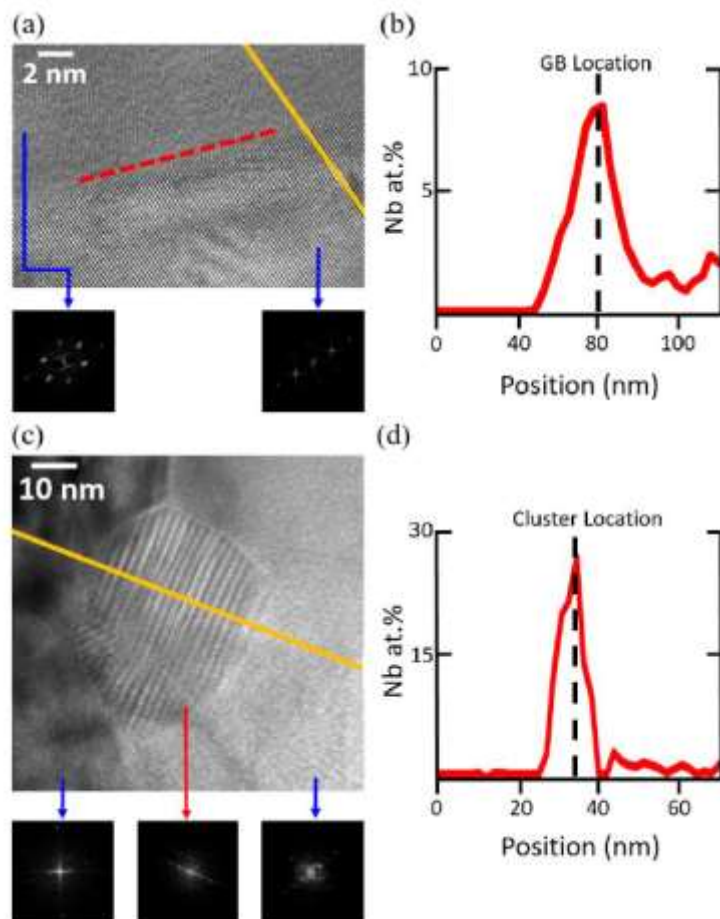


Рис. 6. Зображення HRTEM плівки Cu-Nb:

(а) упорядкована границя зерна та (с) кластер, збагачений Nb, розташований уздовж границі зерна. На менших зображеннях показано FFT (швидке перетворення Фур'є), відібрано впоперек зернограничної плівки та кластера, багатого на Nb, а також частини зерна. Наведені профілі EDS сигналу (b) через границю зерна та (d) кластер, багатий Nb. Жовті лінії на зображеннях (а) і (с) показують місця сканування з границею зерна (GB) і розташуванням кластера, позначеними на профілях ліній EDS сигналу відповідно в (b) і (d) [38]

Аналогічні дослідження, виконані з нанозеренними сплавами на основі Ni [43] показали, що сегрегація легуючого елемента у вигляді термостабільного аморфного шару призводить до поліпшеної

термічної стабільності порівняно зі зразком з тонкими границями.

**Висновки.** Система Cu-Nb інтенсивно досліджується та є актуальною, як з наукового, так і комерційного погляду.



Ніобій визнано найбільш сильнодіючим сегрегантом для обмеження зростання зерен у бінарних сплавах на основі міді.

Для системи Cu-Nb характерним є значний вплив мікродомішок на кінцеву структуру сплаву. Отримання якісних відливок потребує особливих вимог щодо чистоти вхідних матеріалів; застосування певних технологій для усунення забруднення розплаву та його гомогенізації з метою отримання рівномірного розподілення ніобію в матриці.

Ніобій у сплавах на мідній основі використовується для поліпшення фізико-

механічних і технологічних властивостей. Зауважень щодо використання ніобію як добавки для подрібнення зерна не виявлено.

Ніобій вважається одним з перспективних елементів для стабілізації границь зерен у нанокристалічній міді під термічним впливом.

Технології одночасного осадження (конденсації) пари компонентів у вакуумі визнані найбільш перспективними для формування особливого «шару» на межах зерен.

### Список використаних джерел

1. SEYBolt, ALAN U. Effect of Columbium on Some Annealing Characteristics of Copper and 80-20 Cupronickel. *TRANS METALL SOC AIME* 147 (1942): 226-230.
2. Tsuei C. C. and Newkirk L. R. Superconductivity of copper containing small amounts of niobium. *Journal of Materials Science* 8.9 (1973): 1307-1314.
3. Vo N., Schafer J., Averbach R., Albe K., Ashkenazy Y., Bellon P. (2011). Reaching theoretical strengths in nanocrystalline Cu by grain boundary doping. *Scripta Materialia* 65 (8):660-663.
4. Khalajhedayati, Amirhossein, Zhiliang Pan, and Timothy J. Rupert. Manipulating the interfacial structure of nanomaterials to achieve a unique combination of strength and ductility. *Nature communications* 7 (2016): 10802.
5. Schade C., Murphy T., Lawley A. & Doherty R. (2012). Microstructure and mechanical properties of microalloyed PM steels. *International Journal of Powder Metallurgy*. 48(3):51-59.
6. Sooksaeen P., Yongvanich N., Penglao W., Jeentong R. & Worapakapakorn B. (2013). High Content of Niobium on the Properties of Barium Titanate Ceramics. *Ferroelectrics*. 452(1):22-26.
7. Yang Wenfan et al. Strength and ductility of bulk Cu/Nb nanolaminates exposed to extremely high temperatures. *Scripta Materialia*. 166 (2019): 73-77.
8. Kapoor Monica et al. "An atom probe study on Nb solute partitioning and nanocrystalline grain stabilization in mechanically alloyed Cu-Nb. *Acta Materialia*. 126 (2017): 564-575.
9. Flokstra M. G. et al. Observation of anomalous Meissner screening in Cu/Nb and Cu/Nb/Co thin films. *Physical review letters*. 120.24 (2018): 247001.
10. Zhang Liang et al. Liquid-phase thermodynamics and structures in the Cu-Nb binary system. *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 21.2 (2013): 025005.
11. Głuchowski W. et al. Microstructural characterization of high strength high conductivity Cu-Nb microcomposite wires. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*. 46.1 (2011): 40-49.
12. Jia Nan et al. Simulation of shear banding in heterophase co-deformation: example of plane strain compressed Cu-Ag and Cu-Nb metal matrix composites. *Acta Materialia*. 61.12 (2013): 4591-4606.
13. Barbalace K. 1995-2011. Periodic Table of Elements-Copper-Cu and Niobium-Nb. URL: <https://environmentalchemistry.com/yogi/periodic/> [Accessed: 12/12/2023].

14. OKAMOTO H. Cu-Nb (Copper-Niobium). *Journal of phase equilibria and diffusion*. 2012. 33.4: 344-344.
15. Härmäläinen M. et al. A thermodynamic analysis of the binary alloy systems Cu-Cr, Cu-Nb and Cu-V. *Calphad*. 14.2 (1990): 125-137Li.
16. D., Robinson M. B., Rathz T. J. & Williams G. (1998). Liquidus temperatures and solidification behavior in the copper–niobium system. *Acta materialia*.46(11), 3849-3855.
17. Cao, Chongde D. et al. Metastable phase diagrams of Cu-based alloy systems with a miscibility gap in undercooled state. *Journal of materials science*. 46.19 (2011): 6203-6212.
18. Cziegler A. K. and Schumacher P. Investigation of the correlation between growth restriction and grain size in Cu alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. 30.4 (2017): 251-255.
19. Popov I. A. and Shiryaeva N. V. Constitution diagram of Nb-Cu alloys Zh. Neorg. Khim. 6(10). P. 2334-2340 (1961) in Russian; translated as Russ. J. Inorg. Chem. 6(10). P. 1184-1187 (1961).
20. Zhang L., Wang E. G., Zuo X. W., Wang W. B. & He J. C. (2013). Effect of the Linear Electromagnetic Stirring on Microstructure and Properties of Cu-10% Nb Alloys. In *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 395. P. 205-208. Trans Tech Publications Ltd.
21. Laporte Vincent and Andreas Mortensen. Intermediate temperature embrittlement of copper alloys. *International Materials Reviews*. 54.2 (2009): 94-116.
22. Nikolaev A. K. and Rozenberg V. M. Properties of Cu– Nb alloys. *Metal Science and Heat Treatment*. 14.10 (1972): 888-890.
23. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. Москва: Мир, 1972. 406 с.
24. Suzuki H., Kanno M. and Maeda T. Effects of small amounts of additive elements on softening temperature und electrical resistivity of cold-worked pure copper. *Nippon Kinzoku Gakkaishi*. (1952). 47.9 (1983): 794-801.
25. Suzuki H., Kanno M. and Ohsako T. Effect of a Trace Addition of III a Elements on Annealing Characteristics of Cold-Worked Pure Copper. *J. Jpn. Inst. Met.* 48.8 (1984): 854-860.
26. Suzuki H., Kanno M. and Maeda T. Effects of a Small Addition of Transition Elements on the Heat-Resisting and Electrical Properties of Cold-Worked Pure Copper. *J. Jpn. Inst. Met.* 48.2 (1984): 209-213.
27. Makita H., Hanada S. and Izumi O. Effects of 0. 1 mol.% Additional Elements on the Recrystallization Texture of Cold-Rolled Pure Copper. *J. Jpn. Inst. Met.* 50.
28. Lu Bai Ping, Jun Zhe Zhang and Yu Feng Fang. Effects of Nb Element on Mircostructure, Thermal Conductivity and Melting Point of Cu-Ni-Nb Alloy Prepared by Vacuum Arc-Melting. *Advanced Materials Research*. Vol. 941. Trans Tech Publications Ltd, 2014.
29. Foner Simon and Brian B. Schwartz. Superconductor material science: metallurgy, fabrication, and applications. *New-York and London: Plenum Press*. (1981).
30. Filgueira Marcello and Daltro Garcia Pinatti. In situ diamond wires: Part I. The Cu–15 vol.% Nb high strength cable. *Journal of materials processing technology*. 128.1-3 (2002): 191-195.
31. Scher Harvey and Zallen Richard. Critical density in percolation processes. *The Journal of Chemical Physics*. 53.9 (1970): 3759-3761.
32. Davis Joseph R. ed. *Copper and copper alloys*. ASM international, 2001.
33. Guan Ren-Guo and Di Tie. A review on grain refinement of aluminum alloys: progresses, challenges and prospects. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*. 30.5 (2017): 409-432.
34. StJohn D. H. et al. Grain refinement of magnesium alloys: a review of recent research, theoretical developments, and their application. *Metallurgical and materials transactions*. A 44.7 (2013): 2935-2949.

35. Northcott: The Influence of Alloying Elements on the Crystallization of Copper. Part I- Small Additions and the Effect of Atomic Structure, J. Institute of Metals. 1938. Vol. 62, No. 2. P. 101.
  36. Bustos O. L. and Reif W. Kornfeinung von reinstkupfer durch chemische zusa. tze, teil 1. *Metall.* 1993. 47, (11). 1005–1014.
  37. Balart María José et al. Grain refinement of deoxidized copper. *Metallurgical and Materials Transaction.s A* 47.10 (2016): 4988-5011.
  38. Schuler Jennifer D. and Timothy J. Rupert. Materials selection rules for amorphous complexion formation in binary metallic alloys. *Acta Materialia.* 140 (2017): 196-205.
  39. Khalajhedayati A. Rupert T. J. High-temperature stability and grain boundary complexion formation in a nanocrystalline Cu–Zr alloy. *JOM* 67. (2015). 2788–2801.
  40. Rupert Timothy J. The role of complexions in metallic nano-grain stability and deformation. *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* 20.5 (2016): 257-267.
  41. Schuler Jennifer D. et al. Solid-state dewetting instability in thermally-stable nanocrystalline binary alloys. *Materialia.* 9 (2020): 100618.
  42. Turlo Vladyslav and Timothy J. Rupert. Prediction of a wide variety of linear complexions in face centered cubic alloys. *Acta Materialia* 185 (2020): 129-141.
  43. Ding Jie et al. Tailoring the thermal stability of nanocrystalline Ni alloy by thick grain boundaries. *Scripta Materialia.* 182 (2020): 21-26.
- 

Зозуля Едуард Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0003-4598-8182.

Тел.: +38 (057) 707-64-35. E-mail: zozulya.ev@gmail.com.

Зубков Анатолій Іванович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-9013-8158.

E-mail: anatoly.i.zubkov@gmail.com.

Терлецький Олександр Семенович, кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0009-0001-0617-180X.

E-mail: terletskg@gmail.com.

Рябоштан Валентин Анатолійович, аспірант кафедри матеріалознавства, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут». ORCID iD: 0000-0001-5826-5085. E-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com.

Zozulya Eduard, PhD(Tech). Associate Professor, department of of materials science, NTU «KhPI». ORCID iD: 0000-0003-4598-8182. Тел.: +38 (057) 707-64-35. E-mail: zozulya.ev@gmail.com.

Zubkov Anatolii, PhD(Phys.-Math.). Associate Professor, department of of materials science, NTU «KhPI».

ORCID iD: 0000-0001-9013-8158. E-mail: anatoly.i.zubkov@gmail.com.

Terletskyi Oleksandr, PhD(Phys.-Math.). Associate Professor, department of of materials science, NTU «KhPI».

ORCID iD: 0009-0001-0617-180X. E-mail: terletskg@gmail.com.

Riaboshtan Valentin, postgraduate student, department of of materials science, NTU «KhPI».

ORCID iD: 0000-0001-5826-5085. E-mail: obibobbivalkinobi@gmail.com.

Статтю прийнято 10.12.2023 р.

**ТЕПЛОЕНЕРГЕТИКА (144)**

---

УДК 536.242

**ВИБІР ПАРАМЕТРІВ СКРУЧЕНИХ СТРІЧОК ДЛЯ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ  
ТЕПЛОПЕРЕНОСЕННЯ В КАНАЛАХ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ  
ЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБЛАДНАННЯ**

Канд. техн. наук О. О. Алексахін, старш. викл. О. В. Панчук,  
кандидати техн. наук Є. Є. Счастний, О. В. Василенко

**CHOICE OF THE PARAMETERS OF TWISTED TAPES FOR HEAT TRANSFER  
INTENSIFICATION IN THE CHANNELS OF THE POWER EQUIPMENT COOLING  
SYSTEM**

PhD (Tech.) O. Aleksahin, Sr. lecturer O. Panchuk, PhD (Tech.) Y. Schastnyi,  
PhD (Tech.) O. Vasylenko

*Анотація.* У роботі наведено результати аналізу ефективності процесів тепловідведення в каналах системи охолодження енергетичного обладнання.

Розглянуто процеси теплоперенесення у вентиляційних каналах системи охолодження тягових електродвигунів силових установок тепловозів. Проведено аналіз доцільності застосування штучної інтенсифікації процесів теплообміну в каналах за допомогою спіральних стрічок. Інтенсифікатори конвективного теплообміну такого типу характеризуються суттєвим збільшенням коефіцієнтів теплообміну, простотою виготовлення, невеликою матеріалоемністю. Такі пристрої можна використовувати і при проектуванні нових агрегатів, і при модернізації наявного теплообмінного обладнання. Ефективність інтенсифікації процесів теплоперенесення оцінено за рівнем зниження потужності вентиляторів системи охолодження. Оцінювання проведено за умови забезпечення однакових коефіцієнтів тепловіддачі в каналах зі вставками у вигляді спіральних стрічок і каналах без вставок. Довжини спіральних стрічок і каналу однакові. Ефект оребрення поверхні каналу вставками не враховувався. При обчисленні коефіцієнтів конвективного теплообміну і гідравлічного опору використано відомі критеріальні рівняння.

Показано, що, незважаючи на зростання коефіцієнтів гідравлічного опору і втрат тиску в каналах повітряної системи охолодження, використання спіральних стрічок завдяки помітному зменшенню швидкості, а отже, і витрат охолоджувального повітря сприяє зменшенню потужності вентиляторів у широкому діапазоні геометричних параметрів спіральних стрічок при забезпеченні необхідних температур елементів обладнання.

Оцінено вплив температури стінок каналу системи охолодження на необхідну потужність вентиляторів при застосуванні штучних інтенсифікаторів процесу теплообміну у вигляді спіральних стрічок.

Запропоновано рекомендації щодо вибору геометричних характеристик спіральних стрічок, при яких з урахуванням значень температури стінок каналу слід очікувати зменшення потужності вентиляторів системи охолодження.

**Ключові слова:** конвективний теплообмін, коефіцієнт тепловіддачі, система охолодження, тягові електродвигуни, спіральні стрічки.

**Abstract.** *The paper presents the results of analyzing the efficiency of heat removal processes in the channels of the power equipment cooling system.*

*The processes of heat transfer in the ventilation ducts of the cooling system for traction motors of diesel locomotive power plants are considered. The feasibility of using artificial intensification of heat transfer processes in the ducts with the help of spiral tapes is analyzed. Convective heat transfer intensifiers of this type are characterized by a significant increase in heat transfer coefficients, ease of manufacture, and low material consumption. Such devices can be used both in the design of new units and in the modernization of existing heat exchange equipment. The efficiency of intensification of heat transfer processes was evaluated by the level of reduction in the power of cooling system fans. The estimates were made assuming the same heat transfer coefficients in the channels with spiral strip inserts and in the channels without inserts. The length of the spiral tapes and the channel is the same. The effect of finning of the channel surface by the inserts was not taken into account. Known criterion equations were used to calculate the convective heat transfer coefficients and hydraulic resistance.*

*It is shown that, despite the increase in hydraulic resistance coefficients and pressure losses in the channels of the air cooling system, the use of spiral tapes due to a noticeable decrease in the speed and, consequently, the cooling air consumption provides a reduction in fan power in a wide range of geometric parameters of spiral tapes while ensuring the required temperatures of equipment elements.*

*The influence of the temperature of the walls of the cooling system channel on the required fan power when using artificial heat transfer intensifiers in the form of spiral tapes is estimated.*

*Recommendations for the selection of geometric characteristics of spiral tapes are proposed, at which, taking into account the values of the channel wall temperature, a decrease in the power of the cooling system fans should be expected.*

**Keywords:** *thermal convection, heat transfer coefficient, cooling system, traction motor, tape swirl generators.*

**Вступ.** Ефективності використання штучних інтенсифікаторів теплообміну оцінюють, як правило, за умови забезпечення перевищення зростання коефіцієнтів тепловіддачі порівняно зі збільшенням коефіцієнтів гідравлічного опору, що забезпечує зменшення площі поверхні теплообміну і, отже, масогабаритних показників обладнання. Засоби для інтенсифікації процесів теплоперенесення з успіхом використовують у холодильній техніці, котельних агрегатах тощо. У системах охолодження енергетичного обладнання при фіксованій поверхні теплообміну підвищення коефіцієнтів теплообміну застосування засобів штучної інтенсифікації процесів теплоперенесення

обумовлює можливість забезпечення необхідної температури елементів обладнання при менших витратах охолоджувального теплоносія. Для вентиляторів систем охолодження транспортних засобів, які мають привод від силової установки транспортного засобу, зменшення потужності вентиляторів охолодження означає підвищення коефіцієнта корисної дії силової установки.

Порівняти ефективність штучних інтенсифікаторів теплообміну можна за умови забезпечення однакових значень коефіцієнтів тепловіддачі від стінок труби до охолоджувального теплоносія в каналі без штучної інтенсифікації теплообміну і каналі з інтенсифікаторами. Швидкість руху охолоджувального теплоносія і, отже,

коефіцієнти тепловіддачі визначають з умови забезпечення потрібної температури стінок труби. Рівень тепловіддачі при цьому суттєво залежить від геометричних характеристик пристроїв для штучної інтенсифікації теплоперенесення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Засоби інтенсифікації процесів теплообміну широко використовують у різному обладнанні. За даними роботи [1], використання періодично встановлених кільцевих виступів і западин у трубопроводі дає змогу зменшити масогабаритні показники теплообмінної частини газоводяних холодильників у 1,5 раза. Встановлення дротових турбулізаторів у круглій трубі дає змогу приблизно на третину зменшити площу поверхні теплопередачі [2]. Використання труб з розрізними ребрами дає змогу зменшити габарити калориферів у 1,5–1,75 раза [3]. За результатами роботи [4], використання спірального оребрення конвективних поверхонь нагріву котельних агрегатів дає змогу на 17-43 % підвищити інтенсивність теплообміну. Підвищення коефіцієнтів тепловіддачі передбачає створення умов, що забезпечують зрив пограничного шару на стінках каналу. Цього можна досягти або завдяки збуренням у пристінному шарі потоку охолоджувального теплоносія [5, 6], або закручуванням потоку. В останньому випадку руйнування пограничного шару відбувається внаслідок зростання рівня турбулентності зовнішнього потоку [7-9]. Доцільність застосування того чи іншого методу інтенсифікації визначається для кожного конкретного випадку окремо.

Засоби, завдяки яким можна здійснити закручування потоку в каналах, виготовляють у вигляді тангенціальних каналів, шнеків, скрученої стрічки тощо.

Інтенсифікатори конвективного теплообміну у вигляді скрученої стрічки відрізняються простотою виготовлення, невеликою матеріалоемністю. Такі засоби можна використовувати і при проектуванні нових агрегатів, і при модернізації наявного теплообмінного обладнання. Результати розрахункових досліджень ефективності використання стрічкових завихрювачів у каналах системи охолодження тягових електродвигунів транспортних силових установок викладено в роботах [9, 10]. За результатами роботи [10], рівень зменшення потужності вентиляторів системи охолодження, який залежить від геометричних характеристик стрічкового завихрювача, становить близько 12 %. Результати роботи не диференційовані залежно від температури стінки, хоча рівень температури елементів обладнання помітно впливає на показники роботи системи охолодження.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є визначення геометричних параметрів скручених стрічок, які забезпечують мінімальну потужність вентиляторів повітряної системи охолодження залежно від температури на поверхні каналів системи охолодження. Завданнями дослідження є:

- визначення коефіцієнтів гідравлічного опору й втрат тиску в циліндричних каналах зі спіральною стрічкою за умови забезпечення однакового теплового режиму в каналах зі спіральною стрічкою і каналах без штучної інтенсифікації теплообміну;

- оцінювання впливу температури поверхні каналу системи охолодження на параметри скручених стрічок.

**Основна частина дослідження.** Температуру на поверхні каналу для відведення теплоти можна визначити з балансового співвідношення

$$Q = \alpha \cdot F(t_{ст} - t_{сп}) = W \cdot f \cdot C(t_{вих} - t_{вх}), \quad (1)$$

де  $Q$  – теплове навантаження на один канал системи охолодження, Вт;

$\alpha$  – коефіцієнт тепловіддачі від стінок каналу до охолоджувального теплоносія, Вт/(м<sup>2</sup>°С);

$F$  – площа поверхні теплообміну каналу,  $m^2$ ;

$t_{cp} = 0,5(t_{вих} + t_{вх})$  – середня температура охолоджувального теплоносія в каналі,  $^{\circ}C$ ;

$t_{вх}, t_{вих}$  – температура теплоносія відповідно на вході до каналу і виході з каналу,  $^{\circ}C$ ;

$W$  – середня швидкість охолоджувального теплоносія в перерізі каналу,  $m/c$ ;

$f$  – площа перерізу каналу,  $m^2$ ;

$C$  – питома теплоємність охолоджувального теплоносія,  $Dж/(кг^{\circ}C)$ .

Коефіцієнти теплообміну обчислюють за критеріальними рівняннями залежно від режиму руху охолоджувального теплоносія, форми перерізу каналу тощо [11, 12]. У роботі розглянуто варіант виконання повітряної системи охолодження у вигляді системи циліндричних каналів. Коефіцієнти теплообміну в циліндричному каналі без спіральної стрічки обчислено за формулою [13]

$$Nu_0 = \frac{\alpha_0 \cdot d}{\lambda_0} = 0.021 \cdot Re_0^{0.8} Pr_0^{0.43}, \quad (2)$$

де  $Re_0 = \frac{W_0 \cdot d}{\nu_0}$ ,  $Pr$  – критерії Рейнольдса і Прандтля для потоку охолоджувального теплоносія в каналі без спіральної стрічки, де  $d$  – діаметр каналу,  $m$ ;

$W_0$  – середня швидкість охолоджувального теплоносія в каналі без спіральної стрічки,  $m/c$ ;

$\nu_0$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості,  $m^2/c$ .

За співвідношенням (1), значення швидкості, при якому забезпечується необхідна температура стінок у каналі без спіральної стрічки, дорівнює,  $m/c$ ,

$$W_0 = \left[ \frac{0.023 \cdot (\theta_0 - 0.5) \cdot F}{Pr_0^{0.57} \cdot f} \right]^5 \cdot \left( \frac{\nu_0}{d} \right), \quad (3)$$

де  $\theta_0 = \frac{t_{ст.0} - t_{вх.0}}{t_{вих.0} - t_{вх.0}}$  – відносна температура стінки каналу.

З урахуванням значень величин формула (3) для визначення необхідної швидкості руху теплоносія в циліндричному каналі повітряної системи трансформується до вигляду,  $m/c$ ,

$$W_0 = \left[ 0.11 \cdot (\theta_0 - 0.5) \cdot \left( \frac{L}{d} \right) \right] \cdot \left( \frac{\nu_0}{d} \right), \quad (4)$$

де  $L$  – довжина каналу,  $m$ .

Розглянуто випадок розміщення спіральної стрічки по всій довжині циліндричного каналу. Основною геометричною характеристикою спіральних вставок, яка визначає процеси перенесення теплоти і втрати тиску в каналі, є крок закручування спіралі ( $S$ ) (рис. 1). Коефіцієнти теплообміну в такому випадку можна обчислити за формулою [2]

$$Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot d}{\lambda_1} = 0.021 \cdot Re_1^{0.8} \cdot Pr_1^{0.43} \cdot A_3, \quad (5)$$

де  $Nu_1 = \frac{\alpha_1 \cdot d}{\lambda_1}$  – узагальнений коефіцієнт теплообміну (критерій Нуссельта);

$\lambda_1$  – коефіцієнт теплопровідності охолоджувального теплоносія,  $Вт/м^{\circ}C$ ;

$Re_1 = \frac{W_1 \cdot d}{\nu_1}$  – критерій Рейнольдса,

де  $W_1$  – середня швидкість охолоджувального теплоносія у перетині каналу зі спіральною стрічкою,  $m/c$ ;

$\nu_1$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості охолоджувального теплоносія,  $m^2/c$ .

$Pr_1$  – критерій Прандтля для охолоджувального теплоносія;

$A_3 = 1 + \frac{5.65 \cdot 10^4}{Re_1^{1.2}} \cdot \frac{d}{S}$  – комплекс;

$d$  – діаметр каналу,  $m$ .

Із умови забезпечення однакових коефіцієнтів теплообміну в каналі без спіральної стрічки і каналі зі спіральною

стрічкою співвідношення швидкостей має вигляд, м/с,

$$W_1 = \frac{W_0}{A_3^{1.25}} \quad (6)$$

Графік залежності відносної швидкості охолоджувального теплоносія

від відносного кроку закручування спіральної стрічки подано на рис. 1.

Температуру охолоджувального повітря на вході до каналу прийнято однаковою для всіх розглянутих варіантів – 20 °С. Потужність вентилятора системи охолодження визначається витратами повітря і втратами тиску в каналах системи.

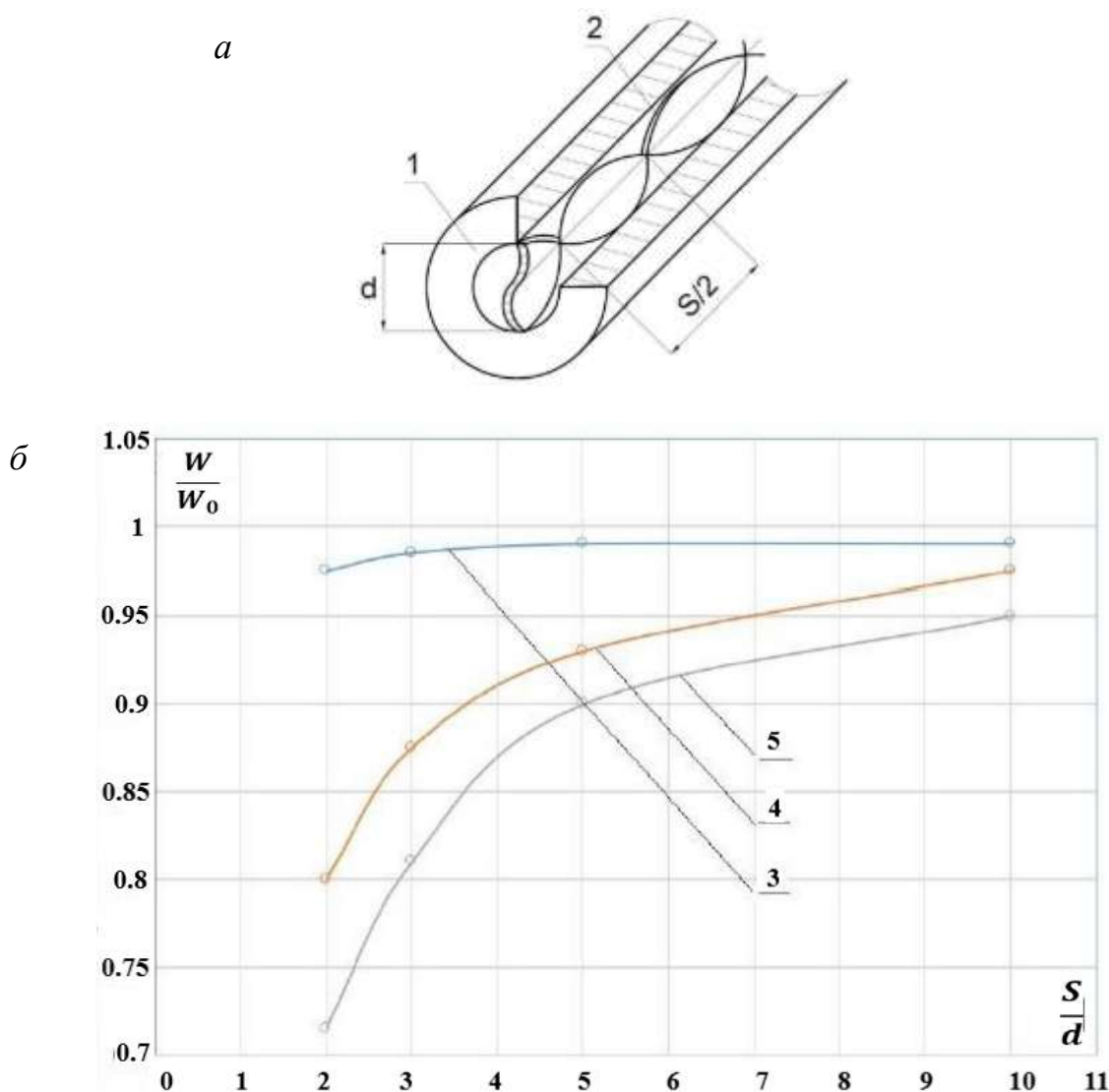


Рис. 1. Результати обчислень зміни швидкості охолоджувального повітря:

а – схема розміщення спіральної стрічки в каналі:

1 – циліндричний канал; 2 – спіральна стрічка;

б – графік залежності відносної швидкості охолоджувального теплоносія від відносного кроку закручування спіральної стрічки: 3, 4, 5 – швидкості повітря при температурі стінки каналу  $t_{ст} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно



З рис. 1 видно, що встановлення стрічкового завихрювача в каналі системи охолодження дає змогу забезпечити однакові умови відведення теплоти при менших швидкостях, а отже, і менших витратах охолоджувального теплоносія. Причому зменшення швидкості повітря при зменшенні величини  $S$  зафіксовано в широкому діапазоні температур стінки каналу. З іншого боку, використання штучних інтенсифікаторів теплообміну з меншими значеннями відносного кроку закручування спіральної стрічки веде до зростання втрат тиску при русі теплоносія через канал. Отже, існує діапазон значень, при яких можливе зменшення потужності вентиляторів системи охолодження.

Втрати тиску в каналі визначено за формулою [9], Па,

$$\Delta P = \zeta \cdot \rho \cdot \frac{w^2}{2}, \quad (7)$$

де  $\zeta$  – коефіцієнт гідравлічного опору;

$\rho$  – густина охолоджувального теплоносія, кг/м<sup>3</sup>.

Для визначення коефіцієнта гідравлічного опору в каналі зі спіральною

стрічкою  $\xi_1$  використане співвідношення [2]

$$\xi_1 = \xi_0 \left[ 1 + 14,35 \cdot \left( \frac{d}{s} \right)^4 \right], \quad (8)$$

де  $\xi_0$  – коефіцієнт гідравлічного опору в каналі без спіральної стрічки, який обчислено за формулою [14]

$$\xi_0 = \frac{0.316}{Re_0^{0.25}}. \quad (9)$$

Зміну коефіцієнта гідравлічного опору і втрат тиску в каналі зі спіральною стрічкою залежно від геометричного параметра стрічки показано на рис. 2. Результати обчислень подано як відношення характеристик гідравлічного режиму в каналі зі штучними інтенсифікаторами теплообміну до значень для каналу без спіральної стрічки. Як видно з рис. 2, при зменшенні величини параметра закручування стрічки, тобто при більш інтенсивному закручуванні потоку, спостерігається зростання коефіцієнта гідравлічного опору і втрат тиску повітрям при русі в каналі.

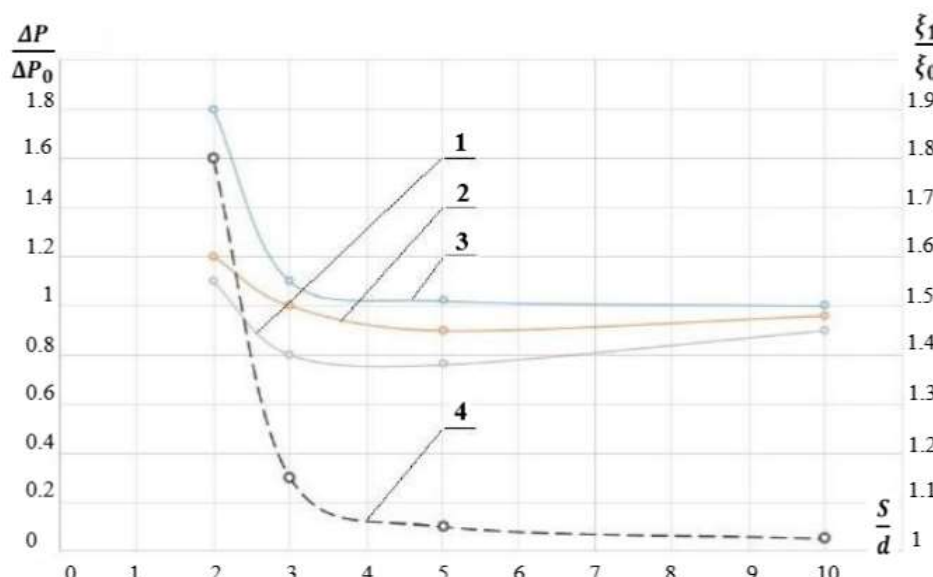


Рис. 2. Результати обчислень коефіцієнта гідравлічного опору і втрат тиску в каналі системи охолодження:

1, 2, 3 – температури стінки каналу  $t_{ст} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно

Потужність вентиляторів системи охолодження обчислено за формулою [9], Вт,

$$N = \frac{W \cdot f \cdot \Delta P}{\eta_B}, \quad (10)$$

де  $f$  – площа перерізу каналу системи охолодження, м<sup>2</sup>;

$\eta_B$  – коефіцієнт корисної дії вентилятора.

З урахуванням виразів (7)-(9) відношення потужності вентиляторів системи повітряного охолодження при використанні спіральних стрічок до потужності вентиляторів без штучних інтенсификаторів теплообміну має вигляд

$$\frac{N_1}{N_0} = \frac{\left[1 + 14.35 \cdot \left(\frac{d}{S}\right)^4\right]}{\left(1 + \frac{5.65 \cdot 10^4 \cdot d}{Re_1^{1.2} \cdot S}\right)^{3.75}}. \quad (11)$$

У формулі (11) індексом «1» позначені величини для каналу зі спіральними стрічками, індексом «0» – без штучної інтенсифікації теплообміну. У формулі не враховано зміну теплофізичних характеристик охолоджувального повітря, що для температурних умов режимів роботи системи охолодження тягових електродвигунів є припустимим.

Зміну потужності вентилятора системи охолодження залежно від зміни геометричного параметра стрічки показано на рис. 3.

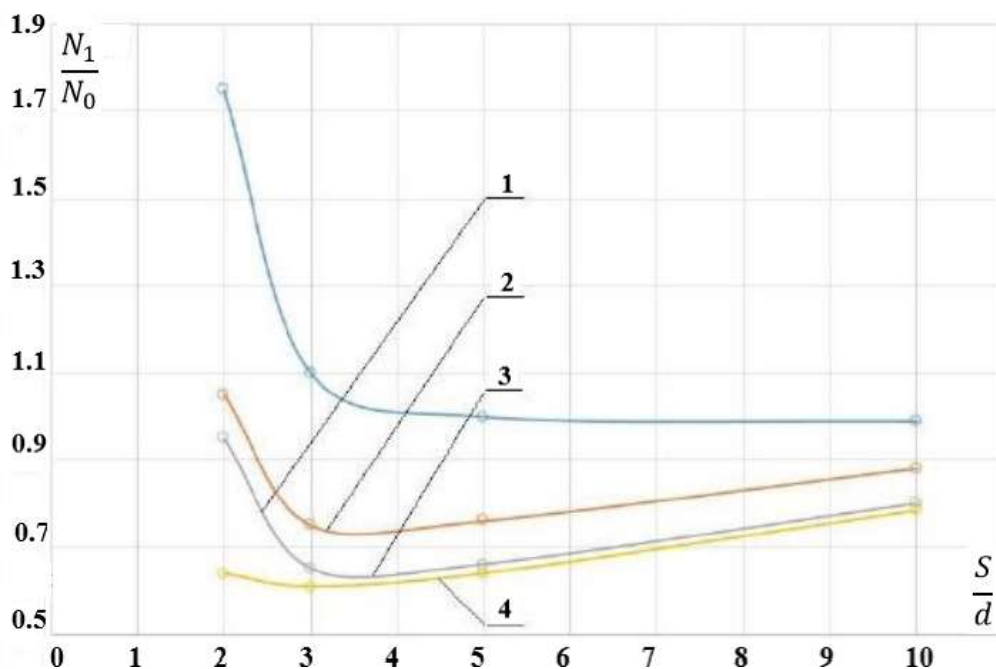


Рис. 3. Результати обчислень потужності вентиляторів системи охолодження: 1, 2, 3, 4 – значення при температурі стінки каналу  $t_{ст} = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  відповідно

Наведені на рис. 3 результати свідчать, що застосування спіральних стрічок для інтенсифікації теплообміну в каналах повітряних систем охолодження дає змогу зменшити потужність вентиляторів на 3-38 % порівняно з

показниками системи охолодження без штучної інтенсифікації теплообміну. Для всіх розглянутих режимів існує діапазон зміни параметра спіральної стрічки, у якому співвідношення потужностей  $N_1/N_0$  має мінімальну величину. На вказаний

діапазон геометричних характеристик спіральної стрічки помітно впливають температурні режими роботи обладнання. Результати обчислень узагальнені залежно від температури поверхні стінки каналу, що

дасть змогу вибирати раціональні параметри інтенсифікаторів з урахуванням припустимих температур конструкційних матеріалів обладнання. Спіральні стрічки з кроком закручування

$$(0.0144 \cdot t_{ct} - 1,12)^{-1} < S/d < (0.0055 \cdot t_{ct} - 0.38)^{-1}$$

забезпечують найменшу потужність вентилятора для прокачування повітря через циліндричні канали системи охолодження сердечника тягового електродвигуна.

**Висновки.** 1. Показано, що використання спіральних стрічок для підвищення коефіцієнтів тепловіддачі в каналах систем охолодження енергетичного обладнання дає змогу зменшити витрати охолоджувального теплоносія і, отже, витрат енергії на транспортування теплоносія через систему охолодження.

2. Незважаючи на зростання втрат тиску в каналах повітряної системи охолодження, використання спіральних

стрічок забезпечує зменшення потужності вентиляторів у широкому діапазоні геометричних параметрів спіральних стрічок.

3. Проаналізовано вплив температури стінок каналу зі спіральними стрічками на потужність вентиляторів системи охолодження.

4. Найменшу потужність вентилятора для прокачування повітря через циліндричні канали системи охолодження сердечника тягового електродвигуна зафіксовано при використанні спіральних стрічок з кроком закручування стрічки

$$(0.0144 \cdot t_{ct} - 1,12)^{-1} < S/d < (0.0055 \cdot t_{ct} - 0.38)^{-1}$$

### Список використаних джерел

1. Behfard M. & Sohankar A. Numerical investigation for finding the appropriate design parameters of a fin-and-tube heat exchanger with delta-winglet vortex generators. *Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 52. P. 21–37. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-015-1705-1>.
2. Pratap Kumar Rout, Sujoy Kumar Saha. Laminar Flow Heat Transfer and Pressure Drop in a Circular Tube Having Wire-Coil and Helical Screw-Tape Inserts. *J. Heat Transfer*. 2013, 02. Vol. 135. Is. 2. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1115/1.4007415>.
3. Liang G., Islam M. D., Kharoua N., Simmons R. Numerical study of heat transfer and flow behavior in a circular tube fitted with varying arrays of winglet vortex generators. *International Journal of Thermal Sciences*. 2018. Vol. 134. P. 54-65. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.08.004>.
4. Галушак І. В. Підвищення ефективності конвективних поверхонь нагріву котельних агрегатів в системах теплогазопостачання: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Харків, 2016. 20 с.
5. Mohsen Sheikholeslami, Mofid Gorji-Bandpy, Davood Domiri Ganji. Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 49. P. 444-469. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.113>.
6. Павловський В. Г. Особливості гідродинаміки і теплообміну в некруглих каналах: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2006. 104 с.
7. Sagnik Pal, Sujoy Kumar Saha. Laminar fluid flow and heat transfer through a circular tube having spiral ribs and twisted tapes. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2015, 01. Vol. 60. P. 173-181. URL: <https://doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2014.09.005>.

8. Nanan K., Yongsiri K., Wongcharee K., Tianpong C., Eiamsa-ard S. Heat transfer enhancement by helically twisted tapes inducing co- and counter-swirl flows. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2013, 08. Vol. 46. P. 67-73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.05.015>.

9. Aleksahin O., Panchuk O., Pogoreliy V. Intensification of heat exchange with the help of a flow. *Theses of international scientific conference «Globalization of scientific and educational space. Innovations of transport. Problems, experience, prospects»*. Dresden – Paris, 2017. P. 152-153.

10. Aleksahin A., Panchuk A. V., Parkhomenko L. A., Bilovol H. V. Heat transfer in the Ducts of the Cooling Systems of Traction Motors. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018, 7 (4/3). P. 315–319. URL: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19824>.

11. Prashant W. Deshmukh, Rajendra P. Vedula. Heat transfer and friction factor characteristics of turbulent flow through a circular tube fitted with vortex generator inserts. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2014, 12. Vol. 79. P. 551-560. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.08.042>.

12. Pengxiao Li, Zhichun Liu, Wei Liu, Gang Chen. Numerical study on heat transfer enhancement characteristics of tube inserted with centrally hollow narrow twisted tapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2015, 09. Vol. 88. P. 481-491. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2015.04.103>.

13. Лабай В. Й. Приклади і задачі з курсу тепломасообміну: навч. посіб. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2017. 228 с.

14. Омельченко О. В., Цвіркун Л. О. Тепломасообмін: навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2021. 100 с.

---

Алексахін Олександр Олексійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри фізики нетрадиційних енерготехнологій та екології, Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна. ORCID iD: 0000-0002-2253-8501. Тел.: +38 (096) 251-06-13. E-mail: [a.aleksahin@karazin.ua](mailto:a.aleksahin@karazin.ua).

Панчук Олексій Вікторович, старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-0852-1543. Тел.: +38 (066) 415-69-59. E-mail: [panchuk.o@kart.edu.ua](mailto:panchuk.o@kart.edu.ua).

Счастний Євген Євгенович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-1607-2426. Тел.: +38 (050) 301-30-35. E-mail: [esch@kart.edu.ua](mailto:esch@kart.edu.ua).

Василенко Олег Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6770-0955. Тел.: +38 (067) 396-67-47. E-mail: [vasylenko@kart.edu.ua](mailto:vasylenko@kart.edu.ua).

Aleksahin Oleksandr, PhD (Tech.). Associate Professor, department of physics of non-traditional energy technologies and ecology, V.N. Karazin Kharkov National University. ORCID iD: 0000-0002-2253-8501.

Tel.: +38 (096) 251-06-13. E-mail: [a.aleksahin@karazin.ua](mailto:a.aleksahin@karazin.ua).

Panchuk Oleksii, Sr. lecturer, department of heat engineering, heat engines and energy management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-0852-1543. Tel.: +38 (066) 415-69-59.

E-mail: [panchuk.o@kart.edu.ua](mailto:panchuk.o@kart.edu.ua).

Schastnyi Yeugen, PhD (Tech.). Associate Professor, department of heat engineering, heat engines and energy management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-1607-2426.

Tel.: +38 (050) 301-30-35. E-mail: [esch@kart.edu.ua](mailto:esch@kart.edu.ua).

Vasylenko Oleh, PhD (Tech.). Associate Professor, department of heat engineering, heat engines and energy management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6770-0955.

Tel.: +38 (067) 396-67-47. E-mail: [vasylenko@kart.edu.ua](mailto:vasylenko@kart.edu.ua).

Статтю прийнято 6.11.2023 р.

УДК 697.347

**ДОСВІД ПОЕТАПНОГО ПЕРЕОБЛАДНАННЯ ЗАГАЛЬНОБУДИНКОВОЇ  
ВЕРТИКАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ОПАЛЕННЯ В ПОКВАРТИРНУ ГОРИЗОНТАЛЬНУ**

Д-р техн. наук О. М. Тарадай, кандидати техн. наук В. С. Бугай, О. В. Гвоздецький,  
асп. С. В. Дяченко

**EXPERIENCE OF A STAGE-BY-STAGE RETROFITTING OF THE GENERAL HOUSE  
VERTICAL HEATING SYSTEM INTO IN APARTMENT HORIZONTAL**

Dr. Sc. (Tech.) O. Taradai, PhD (Tech.) V. Bugai, PhD (Tech.) O. Gvozdeckiy,  
postgraduate student S.V. Diachenko

***Анотація.** У статті розглянуто основні проблеми житлових будинків України, побудованих у 60–90-ті роки минулого століття, де внутрішньобудинкові системи опалення не мають індивідуального регулювання споживання тепла кожною квартирою. Розглянуто практичний досвід переобладнання вертикальної нерегульованої системи опалення в регульовану поквартирну з власними комерційними приладами обліку тепла в багатоповерховому житловому будинку без зміни його джерела теплоти. Наведено техніко-економічний аналіз реконструкції системи опалення в багатоповерховому житловому будинку.*

***Ключові слова:** централізоване теплопостачання, система опалення, облік тепла, споживання теплової енергії.*

***Abstract.** The article considers the main mistakes in the design and construction of district heating systems, presents the problems of residential buildings in Ukraine built in the 60-90s of the last century, which unlike modern residential buildings with horizontal two-pipe regulated systems, are equipped with one-pipe vertical non-regulated heating systems with cast iron radiators or steel convectors. They have no shut-off and regulating valves, no individual regulation of heat consumption by each flat and actually turns into one heating device, where heat consumption can be regulated only by gate valves at the building inlet. As a consequence, due to the imperfect design of heating systems, 80% of the housing stock in Ukraine do not have the possibility of regulated, economical heat consumption. The article considers the practical experience of retrofitting of the general house vertical unregulated heating system into a regulated apartment horizontal heating system with its own commercial heat metering devices. The need for such a phased reconstruction of the heating system by replacing the old building-wide vertical one-pipe system with a two-pipe horizontal one is dictated by economic considerations for the consumption of fuel and energy resources, the requirements of modern standards and, most importantly, the creation of a real opportunity for all subscribers and suppliers to regulate the production of heat energy. Objective economic analysis shows that the cost of retrofitting of the heating system into a regulated apartment horizontal heating system is cheaper than autonomous heating with individual gas boilers. Reconstruction of in-house heating systems is an objective necessity, without which it is impossible for the subscriber to have a real influence on his own heat consumption.*

***Keywords:** central heating, heating system, vertical, horizontal, apartment, heat metering, thermal energy consumption.*

**Вступ.** В Україні особливо актуальним є завдання енергозбереження та економії паливно-енергетичних ресурсів у житлово-комунальному господарстві та будівництві. Протягом останніх десятиліть вирішення цього завдання знаходиться в центрі уваги фахівців будівельного і теплоенергетичного профілю.

У колишньому Радянському Союзі ідея централізованого тепlopостачання була спотворена в гонитві за уявною економією матеріалів і прагненням будь-якою ціною вирішити кількісні завдання.

У централізованому тепlopостачанні було допущено дві принципів, найбільш грубі помилки:

1) будівництво теплотрас у підземних непрохідних каналах без належної теплоізоляції трубопроводів; системи гарячого водopостачання проектувалися зі звичайних чорних труб без оцинкування, емалювання, інших видів металопокриття або неметалевих труб;

2) обладнання всіх багатоповерхових будівель однотрубними вертикальними системами опалення фактично з

непрацездатною запірною та регулюючою арматурою. За теоретичними розрахунками, такі внутрішньобудинкові системи опалення мають регулюватися самими споживачами, тим самим забезпечуючи економне теплоспоживання, але на практиці всі вертикальні однотрубні системи опалення виявилися з низьким рівнем можливості регулювання або взагалі нерегульованими. Фактично кожен житловий, громадський будинок чи промислова будівля з такою системою – це єдиний нагрівальний прилад, регулювання якого можливе лише засувками, розташованими на вводі в будівлю.

Допущені грубі помилки при проектуванні та будівництві теплових мереж і внутрішньобудинкових систем опалення призвели до неможливості їхньої нормальної експлуатації й, головне, до втрат тепла, які в разі перевищують показники аналогічних європейських систем.

На рис. 1 зображено співвідношення втрат теплоти в системах централізованого тепlopостачання.

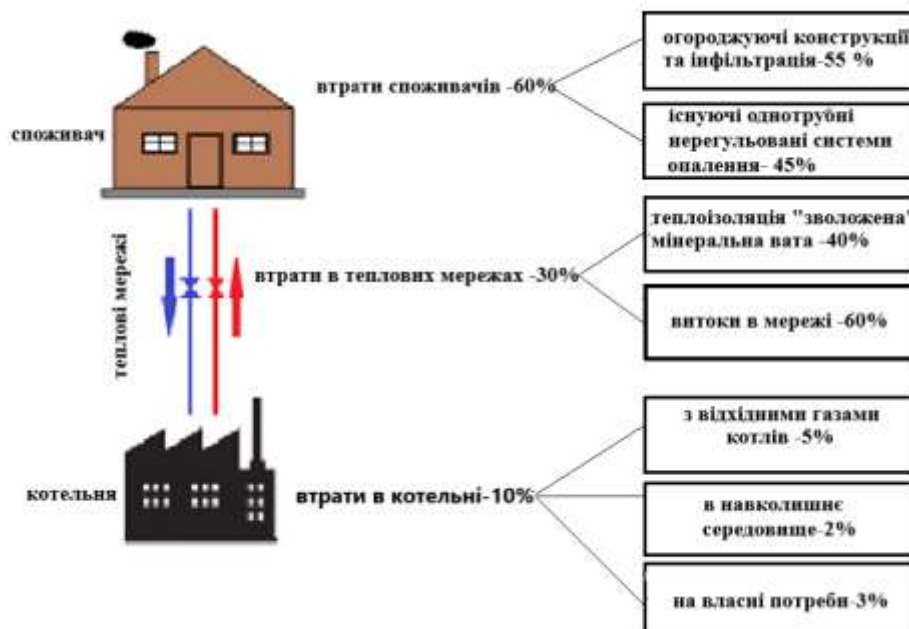


Рис. 1. Співвідношення втрат теплоти в системах централізованого тепlopостачання

Багаторічний досвід використання централізованого теплопостачання показав, що в ланцюжку «джерело теплоти – теплові мережі – споживач» найслабшою ланкою є саме споживач – житлові будинки. На них припадає близько 60 % втрат теплової енергії. Ще 30 % втрат тепла припадає на магістральні та розподільні теплові мережі та 10 % – на джерела теплової енергії. Такі втрати призводять до підвищення цін на комунальні послуги з опалення та гарячого водопостачання.

У Харківському регіоні близько 80 % житлового фонду – це типові панельні, блокові та цегляні будинки забудови 60–90-х років минулого століття, в основному серій 464, 468, 38, П-57, обладнані однотрубними вертикальними нерегульованими системами опалення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні показує, що будинки забудови 60–90-х років минулого століття – це застарілий житловий фонд, який за технічним станом не відповідає сучасним нормативним вимогам щодо безпечного і комфортного проживання, їхній граничний строк експлуатації давно збіг, знос основних конструкційних елементів становить до 60 % [1].

Технічний стан житлового фонду м. Харкова характеризується високим коефіцієнтом зносу (понад 50 %) [2]. Переважна більшість цих будинків обладнана сталевими однотрубними вертикальними нерегульованими системами опалення з верхньою або нижньою розводкою, елеваторним вузлом і залежною схемою приєднання до теплових мереж. Такі системи не мають ні місцевого, ні індивідуального регулювання та повністю виключають хоч найменшу можливість власнику квартири заощадити теплову енергію [3-5].

Вартість опалення одного квадратного метра визначається постачальником тепла шляхом ділення загальної кількості тепла, спожитого

будинком за місяць, за показаннями загальнобудинкового лічильника, на сумарну площу всіх опалюваних квартир і множення на вартість однієї гікакалорії тепла [6]. Тобто оплата за спожиту теплову енергію власником квартири здійснюється з розрахунку вартості опалення одного квадратного метра житлової площі квартири, помноженої на площу квартири.

Опалення місць загального користування та інших загальнобудинкових втрат також входить до вартості опалення одного квадратного метра квартири.

Для реальної економії потрібна повна реконструкція вертикальних нерегульованих однотрубних систем опалення, які повністю відпрацювали свій строк експлуатації. Ці системи необхідно замінити на поквартирні двотрубні з установленням лічильників тепла в кожній квартирі (рис. 2). Це дасть можливість кожному власнику квартири багатопверхового будинку платити за спожиту теплову енергію за показаннями квартирної лічильника (за фактично спожите тепло) [7-11].

**Визначення мети дослідження.** У статті розглянуто практичний досвід переобладнання в багатопверховому житловому будинку вертикальної нерегульованої системи опалення на регульовану індивідуальну поквартирну з приладами обліку теплової енергії без зміни джерела тепла. Наведено техніко-економічний аналіз відповідної реконструкції системи опалення.

**Основна частина дослідження.** Дедалі частіше трапляються випадки, коли власники квартир намагаються переобладнати однотрубні вертикальні нерегульовані системи опалення в однотрубні вертикальні регульовані зі встановленням радіаторних клапанів з термостатичними елементами на нагрівальних приладах [12].

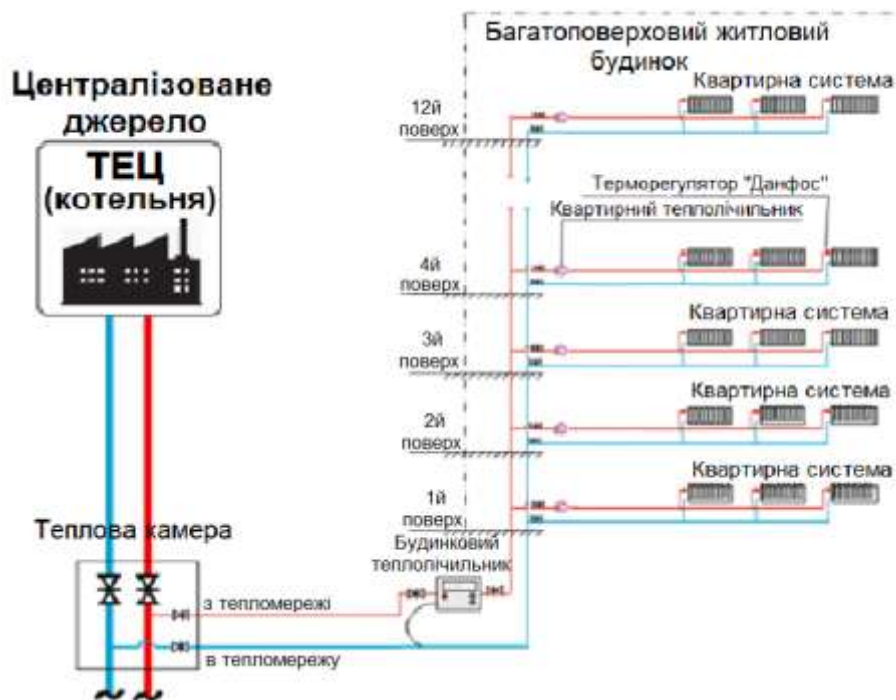


Рис. 2. Двотрубна система опалення багатоповерхового житлового будинку з горизонтальною поквартирною розводкою, вузлами комерційного та розподільного обліку теплової енергії

У місті Чугуєві Харківської області в житловому будинку, розташованому на вулиці Червономанежній, 32Б [13, 14], було проведено поетапну реконструкцію загальнобудинкової вертикальної нерегульованої системи опалення на регульовану індивідуальну поквартирну з приладами обліку тепла. Основні роботи зі збору вихідних даних, обмірювання існуючої загальнобудинкової системи опалення, проектування, монтажу та налагодження нових індивідуальних поквартирних систем опалення проводилися фахівцями Міжгалузевої регіональної корпорації «Теплоенергія» (МРК «Теплоенергія») спільно з фахівцями КП «Чугуївтепло», яка здійснює теплопостачання будинку без зупинки загальнобудинкової системи опалення та відселення мешканців тих квартир, які виявили бажання на переобладнання,

упродовж усього опалювального сезону. Під час проведення робіт не було допущено суттєвих порушень конструкцій будівлі чи оздоблення приміщень.

Слід зазначити, що за теперішніх умов, коли в Україні триває війна і пошкоджено окремі квартири та частини будівель, отриманий досвід із переобладнання квартир упродовж усього опалювального сезону при теперішній системі опалення набуває великого значення.

На сходових клітках кожного під'їзду прокладені теплоізольовані подавальний і зворотний стояки (рис. 3), до яких підключаються гілки горизонтальних двотрубних систем опалення через вузли розподільного обліку теплової енергії (рис. 4). Трубопроводи системи опалення прокладені відкрито, хоча можливий варіант прихованого прокладання.



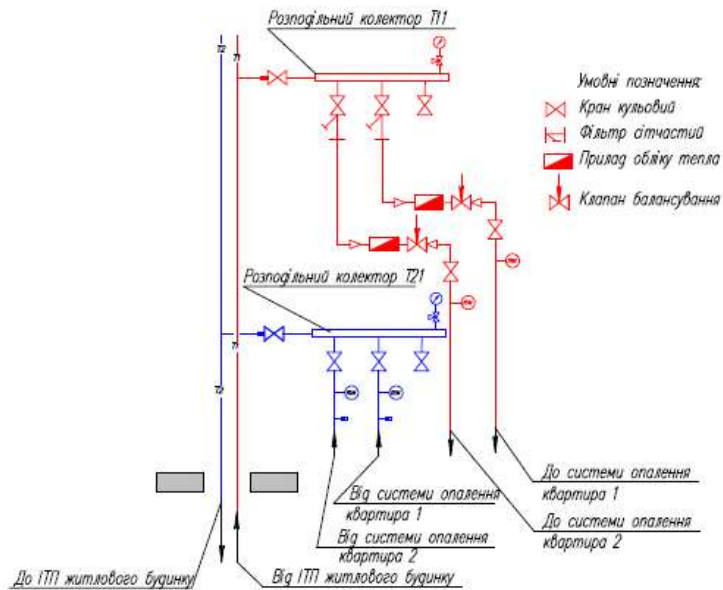


Рис. 3. Схема прокладання теплоізованих подавальних і зворотних стояків на сходових клітках



Рис. 4. Фрагмент установлення квартирної лічильника тепла

Слід зазначити, що саме відсутністю нових вертикальних стояків і необхідності пробивати міжповерхові перекриття запропонований проєкт докорінно відрізняється від проєктів інших авторів, які пропонують реконструювати теперішню вертикальну однотрубну систему в таку саму вертикальну двотрубну, тобто додати ще одну вертикальну трубу поряд з наявним стояком.

Радіатори відключаються від вертикального стояка та після промивання та очищення приєднуються до заново прокладених квартирних трубопроводів. За бажанням власника житла можна встановити сучасні біметалеві радіатори (рис. 5), що значно підвищують тепловіддачу у квартирі та зменшують витрати електроенергії на циркуляцію теплоносія. Перед кожним радіатором встановлюється термостатичний клапан з термостатичним елементом.



Рис. 5. Фрагмент установлення нового біметалевого приладу опалення і термостатичного клапана з термостатичним елементом

Власники квартир, які не побажали робити реконструкцію зараз, забезпечуються теплом від старої однотрубною вертикальною системою опалення і розраховуються за комунальні послуги за тарифами теплопостачальної організації відповідно до опалюваної площі.

У житловому будинку вертикальна нерегульована система опалення буде діяти

доти, поки не буде проведено реконструкцію останньої квартири. Труби, прокладені на сходових клітках і далі по підвалу, приєднуються до діючого індивідуального теплового пункту будинку, обладнаного звичайним елеваторним вузлом (рис. 6) і встановленим загальнобудинковим лічильником тепла.



Рис. 6. Елеваторний вузол при залежному підключенні системи опалення житлового будинку до теплових мереж

Проект було реалізовано без реконструкції наявного індивідуального теплового пункту.

Таке рішення обґрунтовується тим, що заміна загальнобудинкової однотрубною вертикальної системи опалення на індивідуальні двотрубні поквартирні, паралельно з'єднані між собою, обумовлює зменшення гідравлічного опору (втрат напору) системи опалення. Тому втрати напору цілком перебиваються елеватором, який вже є [15, 16].

У таблиці наведено витрати на виконання всіх видів робіт в одній квартирі.

Слід зазначити, що наведені в таблиці цифри затрат на переобладнання квартирної системи опалення за проектом є такими самими, як і затрати на переобладнання квартирної системи в проєктах автономного опалення з індивідуальними газовими котлами.

Таблиця

Затрати на влаштування індивідуального поквартирного опалення житлового будинку на вулиці Червономонежній, 32Б в м. Чугуєві

Номер з/п	Квартири	Затрати на переобладнання систем опалення з урахуванням загальнобудинкових затрат, віднесених на одну квартиру (тис. грн)														
		Кількість квартир (шт.)	Прокладання нових труб у квартирі	Заміна опалювальних приладів	Установлення квартирної вузла обліку	Установлення запірної арматури	Установлення термостатичного елемента «Danfoss»	Будівельні роботи з ремонту квартири	Затрати на прокладання трубопроводів по підвалу	Затрати на підключення до ГТП	Затрати на розподільні трубопроводи	Будівельні роботи з ремонту під'їздів і підвалу	Демонтаж старих радіаторів і труб	Затрати на теплоізоляцію стожків старої системи	Сумарні затрати на квартиру	Сумарні затрати на всі квартири
1	Однокімнатні	8	4,2	2,2	8,6	0,26	2,48	0,40	0,30	0,63	4,00	0,30	0,10	0,45	23,92	191,36
2	Двокімнатні	8	6,8	3,3	8,6	0,4	3,72	0,50	0,30	0,63	1,10	0,30	0,15	0,45	26,25	210,00
3	Трикімнатні	12	7,5	4,4	8,6	0,52	4,96	0,60	0,30	0,63	2,30	0,30	0,20	0,45	30,76	369,12
4	Чотирикімнатні	4	7,8	5,5	8,6	0,65	6,20	0,70	0,30	0,63	2,60	0,30	0,25	0,45	33,98	135,92
5	<b>Разом на будинок</b>	<b>32</b>														<b>933,40</b>

Зрозуміло, що при влаштуванні індивідуального поквартирного газового опалення в кожній квартирі додатково до витрат, зазначених у таблиці, необхідно додати встановлення газового котла, улаштування димоходів і вентиляції, прокладання внутрішніх газопроводів до котлів. Крім того, потрібні ще значні витрати на реконструкцію трубопроводів зовнішнього газопостачання, оскільки навантаження на них значно збільшується на величину витрат газу для потреб опалення кожної квартири. Наявні внутрішні та зовнішні газопроводи розраховані тільки на подання газу для потреб приготування їжі.

Об'єктивний економічний аналіз таких, раніше виконаних, проєктів показує, що вартість робіт з установа газопостачання, віднесені на одну квартиру, у разі перевищує подані в таблиці затрати.

Слід нагадати, що будь-який газовий котел у квартирі – це створення вибухонебезпечної ситуації та значне погіршення екологічних показників.

Крім того, слід зазначити, що законодавством заборонено улаштування автономних систем опалення (за наявності централізованого теплопостачання). Можливе відключення лише всього будинку, а не окремих квартир.

Найбільший ефект з економії власники квартир з квартирними системами опалення та лічильниками тепла отримують у жовтні, листопаді, березні, квітні, тобто ті місяці, коли відбуваються різкі коливання температур і можливі «перегриви» квартир. В інші місяці опалювального періоду ефекту економії можна досягти за рахунок можливості зниження температури в приміщеннях у період відсутності господарів, а також за рахунок створення комфортних умов у кожній кімнаті залежно від потреби мешканця [17].

Від впровадження проєкту очікуване зниження споживання тепла квартирою

складає 25-30 % за опалювальний період. Не менший ефект від проєкту отримує державний і муніципальний бюджети, оскільки регулювання споживання тепла кожним мешканцем у сумі дає значне зниження споживання енергоресурсів і трудовитрат у цілому в системах теплопостачання.

### Висновки

1. Досвід теплопостачання будинку на вулиці Червономанежній, 32Б в місті Чугуєві Харківської області та в деяких квартирах м. Харкова довів на практиці, що виконана Міжрегіональною корпорацією «Теплоенергія» спільно з Чугуївською міською радою поетапна реконструкція системи опалення шляхом заміни старої загальнобудинкової вертикальної однотрубною на квартирну горизонтальну двотрубну дала економію кожній квартирі не менше 30 %.

2. До 80 % наявних багатоповерхових житлових будинків України обладнані системами опалення, які не відповідають сучасним вимогам і не дають можливості регульовано, економно споживати теплову енергію.

3. Без заміни в багатоповерхових житлових будинках забудови другої половини ХХ століття вертикальних однотрубних загальнобудинкових нерегульованих систем опалення на горизонтальні двотрубні квартирні регульовані з приладами обліку споживання теплової енергії неможливо вирішити завдання забезпечення кожного власника квартири тією кількістю теплової енергії, яка йому потрібна.

4. Двадцятирічний досвід експлуатації нових житлових будинків з двотрубними квартирними системами опалення з приладами обліку споживання теплової енергії й термостатичними елементами та наведений приклад реконструкції теперішньої системи опалення свідчать про питоме скорочення споживання тепла.

*Список використаних джерел*

1. Про комплексну реконструкцію кварталів (мікрорайонів) застарілого житлового фонду: Закон України від 22.12.2006 р. № 525-V. *База даних «Законодавство України»* / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/525-16#Text>.
2. Програма розвитку і реформування житлово-комунального господарства м. Харкова на 2011-2025 рр. від 27.10.2010 р. (зі змінами та доповненнями, внесеними згідно з рішеннями Харківської міської ради). URL: <http://kharkiv.rocks/reestr/687751>.
3. Росковшенко Ю. К., Штиленко В. П. Індивідуальне автоматичне регулювання та облік теплової енергії в системах водяного опалення. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі: науково-технічний збірник*. Київ, 2013. № 4. С. 238–243.
4. Любарець О. П., Зайцев О. М., Любарець В. О. Проектування водяних систем опалення: посібник для проєктувальників, інженерів і студентів ВНЗ. Відень; Київ; Сімферополь, 2010. 201 с.
5. Вплив конструкції внутрішньобудинкових систем опалення на вибір режимів регулювання централізованого теплопостачання / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, О. В. Гвоздецький, С. В. Дяченко. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: збірник праць*. Київ, 2022. С. 66–73. URL: [http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/sbornik\\_2022.pdf](http://itf.kiev.ua/wp-content/uploads/2022/12/sbornik_2022.pdf).
6. Про теплопостачання: Закон України від 02.06.2005 р. № 2633-IV. *База даних «Законодавство України»* / Верховна Рада України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2633-15#Text>.
7. Централізоване поквартирне опалення з регулюванням та комерційним обліком відпуску тепла / О. М. Тарадай, Л. Л. Покровський, О. Ф. Редько, М. О. Яременко. *Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання: зб. наук. праць*. Київ: КНУБА, 2010. Вип. № 14. С. 36–42.
8. Reconstruction of heating systems of existing residential buildings by means of equipping apartment heating systems with heat meters / O. Taraday et al. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХОТВ АБУ; ХНУБА, 2019. Вип. № 3 (97). С. 70–74. URL: [https://www.researchgate.net/publication/339615107\\_reconstruction\\_of\\_heating\\_systems\\_of\\_existing\\_residential\\_buildings\\_by\\_means\\_of\\_equipping\\_apartment\\_heating\\_systems\\_with\\_heat\\_meters](https://www.researchgate.net/publication/339615107_reconstruction_of_heating_systems_of_existing_residential_buildings_by_means_of_equipping_apartment_heating_systems_with_heat_meters).
9. Semikolenova Y., Pierce L., Hankinson D. Modernization of the Bistrict Heating Systems in Ukraine: Heat Metering and Consumption Based-Billing. Washington: The International Bank for Reconstruction and Development, The World Bank, 2012. 55 p.
10. Поквартирна децентралізація – основа подальшого розвитку екологічно ефективних систем теплопостачання міст / О. М. Тарадай, Д. Ф. Гончаренко, М. А. Яременко та ін. *Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики: збірник праць*. Київ, 2017. С. 56–63. URL: [http://engecology.com/wp-content/uploads/2015/08/sbornik\\_2017ppp\\_small.pdf](http://engecology.com/wp-content/uploads/2015/08/sbornik_2017ppp_small.pdf).
11. Поквартирна децентралізація систем теплопостачання існуючих багатоповерхових житлових будівель на базі чинних джерел теплоти / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, О. Д. Шахненко, С. В. Фоміч. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХОТВ АБУ; ХНУБА, 2017. Т. 89, № 3. С. 166–172. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb\\_2017\\_89\\_3\\_33](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2017_89_3_33).
12. Основні помилки під час ремонту існуючих систем централізованого опалення житлового фонду / І. О. Редько, О. В. Гвоздецький, Ю. І. Чайка, В. Ю. Заїка. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2023. Вип. 203. С. 26–34. URL: [https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht\\_zbirn\\_203\\_2023.pdf](https://kart.edu.ua/wp-content/uploads/2023/04/tht_zbirn_203_2023.pdf).

13. Модернізація системи опалення багатоквартирного житлового будинку в м. Чугуєві Харківської області / О. М. Тарадай, В. С. Бугай, Є. Д. Шахненко, С. В. Фомич. *Науковий вісник будівництва*. Харків: ХОТБ АБУ; ХНУБА, 2018. № 2 (92). С. 259–264. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb\\_2018\\_92\\_2\\_45](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nvb_2018_92_2_45).

14. Рекомендації щодо влаштування квартирних систем опалення з теплотічильниками в існуючих багатоповерхових житлових будинках / за керівництвом О. М. Тарадая. Харків: ХНУБА; МРК «Теплоенергія», 2017. 40 с.

15. Пирков В. В. Сучасні теплові пункти. Автоматика та регулювання. Київ: П ДП «Такі справи», 2008. 252 с.

16. Пирков В. В. Гідравлічне регулювання систем опалення та охолодження. Теорія і практика. Київ: П ДП «Такі справи», 2010. 304 с.

17. Economic dependence of the consumer on the feasibility to regulate the heat supply system / Oleksandr Taradai, Volodymyr Bugai, Oleksandr Gvozdettskyi, Serhii Diachenko. *Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering*. 2022. 2 (59). С. 52–57.

---

Тарадай Олександр Михайлович, доктор технічних наук, професор кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0002-4239-9895. E-mail: [alekst1704@gmail.com](mailto:alekst1704@gmail.com).

Бугай Володимир Сергійович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-5166-7110. E-mail: [vl.bugai@gmail.com](mailto:vl.bugai@gmail.com).

Гвоздецький Олександр Вадимович, кандидат технічних наук, доцент кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0001-5590-4689. E-mail: [npp-tghv@ukr.net](mailto:npp-tghv@ukr.net).

Дяченко Сергій Володимирович, аспірант кафедри теплогазопостачання і вентиляції, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID iD: 0000-0003-0187-0684. E-mail: [dyachenkosv460@gmail.com](mailto:dyachenkosv460@gmail.com).

Taradai Oleksandr, Dr. Sc. (Tech.), Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0002-4239-9895. Tel.: +38(050)323-33-33. Email: [alekst1704@gmail.com](mailto:alekst1704@gmail.com).

Bugai Volodymyr, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-5166-7110. Tel.: +38(050)187-21-50. E-mail: [vl.bugai@gmail.com](mailto:vl.bugai@gmail.com).

Gvozdeckiy Oleksandr, PhD (Tech). Associate Professor of the Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0001-5590-4689. Tel.: +38(050)88-624-88. E-mail: [npp-tghv@ukr.net](mailto:npp-tghv@ukr.net).

Diachenko Serhii, postgraduate student, Department of Heat and Gas Supply, Ventilation, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID iD: 0000-0003-0187-0684. Tel.: +38(098)508-83-19. E-mail: [dyachenkosv460@gmail.com](mailto:dyachenkosv460@gmail.com).

Статтю прийнято 20.11.2023 р.

**БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ (192)**

---

УДК 691.3

**ВПЛИВ УСАДКОВИХ КОНТАКТНИХ НАПРУГ НА МІЦНІСТЬ ЗЧЕПЛЕННЯ ГІДРОІЗОЛЯЦІЙНОГО СКЛАДУ І «СТАРОГО» БЕТОНУ**

Доктори техн. наук Т. О. Костюк, А. А. Пługін, Д. А. Пługін,  
кандидати техн. наук О. В. Макаренко, О. І. Бондаренко, старш. викл. О. Б. Деденюва

**THE EFFECT OF SHRINKAGE CONTACT STRESSES ON THE ADHESION STRENGTH OF THE WATERPROOFING COMPOSITION AND THE «OLD» CONCRETE**

Dr. Sc. (Tech.) T. Kostyuk, Dr. Sc. (Tech.) A. Plugin, Dr. Sc. (Tech.) D. Plugin,  
PhD (Tech) O. Makarenko, PhD (Tech) O. Bondarenko, senior lecturer O. Dedenova

***Анотація.** Робота присвячена дослідженням впливу усадкової контактної напруги на міцність зчеплення гідроізоляційного складу дрібнозернистого цементного бетону і «старого» бетону. У результаті проведених у роботі досліджень встановлено, що ущільнення гідроізоляційного складу, яке сприяє зменшенню внутрішніх напруг при твердінні і, отже, збільшує величину зчеплення його зі «старим» бетоном, досягається шляхом введення тонкомолотого наповнювача карбонату кальцію та комплексу хімічних водорозчинних добавок другого класу. Мінеральний наповнювач і хімічні добавки дають змогу додатково синтезувати при гідратації цементу в його порах і капілярах еtringіт, гідрокарбоалюмінат і гідрохлоралюмінат кальцію, низькоосновні гідросилікати кальцію, кальцит.*

*Розроблений гідроізоляційний склад проникної дії у вигляді будівельної суміші має високі показники адгезійної міцності до «старого» бетону і може призначатися для застосування в ремонтних, відновлювальних роботах і захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд від зовнішніх впливів, пов'язаних з водним середовищем.*

***Ключові слова:** бетон, гідратація, міцність зчеплення, усадка, синтез, кристалогідрати.*

***Abstract.** The paper is devoted to the study of the effect of shrinkage contact stress on the bonding strength of the waterproofing composition of fine-grained cement concrete and «old» concrete. In order to obtain a strong contact when adhering old and new concrete, it is necessary to minimize the amount of internal stress in it.*

*The cause of concrete shrinkage during the initial curing period is the reduction of the cement stone gel, the amount of free water that is consumed by evaporation and hydration of the cement. The semi-bound water (film water) surrounding the gel particles is then consumed. This causes the gel particles to come closer together and shrink further. In addition, the capillary pressure in the pores is very significant and increases with decreasing pore size. Since the micropores are scattered in the cement stone in different directions, the pressure, balancing each other, acts as a comprehensive compression, which also causes volumetric deformation. With further drying of the concrete, the moisture gradient decreases, the growing crystal growths provide more and more*

*resistance to internal pressure and the shrinkage deformation gradually subsides. Thus, the more intensive the hydration processes in the waterproofing coating and the more crystalline hydrates are formed at earlier curing times, the earlier the resistance to comprehensive compression in the coating will be, and as a result, the crack resistance of the coating and the strength of its adhesion to the «old» concrete will increase.*

*As a result of the research carried out in this work, it was found that the compaction of the waterproofing composition, which helps to reduce internal stresses during curing and thus increases the amount of its adhesion to old concrete, is achieved by introducing a finely ground calcium carbonate filler and a complex of chemical water-soluble additives of the second class. The mineral filler and chemical additives allow for the additional synthesis of etringite, calcium hydrocarbonate and calcium hydrochloraluminat, low-base calcium hydrosilicates, and calcite during cement hydration in its pores and capillaries.*

*The developed permeable waterproofing composition in the form of a mortar has high adhesion strength to old concrete and can be used in repair, restoration and protection of building structures, buildings and structures from external influences related to the water environment.*

**Keywords:** concrete, hydration, bonding strength, shrinkage, synthesis, crystalline hydrates.

**Вступ.** Дослідження впливу усадкової контактної напруги на міцність зчеплення гідроізоляційного складу дрібнозернистого цементного бетону і «старого» бетону почалися ще на початку минулого століття. Результати досліджень показали, що при стикі «старого» та нового бетону навіть за 45° нахилу до напрямку розтягнення втрати міцності становлять до 40 % після семи-добової перерви та до 80 % після місячної.

Отже, щоб отримати міцний контакт при зчепленні старого і нового бетону, необхідно звести до мінімуму величину внутрішньої напруги в ньому.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** С. В. Олександровський у своїх роботах зазначав, що при підвищенні вологості в бетоні усадкові деформації виражені слабше і можуть бути зведені до нуля, а в деяких випадках навіть переходять у деформації набухання. Він зазначав також, що після укладання нового бетону на «старий» величина деформацій усадки зменшується внаслідок явища гістерези усадки та набухання, оскільки вони мають однаковий знак заряду для «старого» і нового бетону [1]. У роботах А. Б. Голишева, В. С. Дорофєєва, Н. В. Пушкар, А. В. Мазурака, З. Я. Бліхарського тощо обґрунтовано вплив повзучості на релаксацію напруг у

новому бетоні – що повільніше твердне новий бетон, то повніше релаксації внутрішніх напруг, оскільки частина напруг у результаті усадки релаксує за допомогою повзучості, і міцність зчеплення зростає. Тобто якщо звести до мінімуму різницю між деформаціями усадки нового і «старого» бетону після укладання нового, то контактна міцність у часі збільшується [2–4].

А. М. Плуґіним зі співробітниками показано, що усадка та повзучість бетону є близькими за природою колоїдно-хімічними явищами, які на субмікрорівні визначаються міграцією води з гідросилікатного гелю та по капілярах із стиснутих у розтягнуті зони конструкцій, на мезо- та макрорівні – стисканням прошарків між зернами заповнювачів, частинками мінеральних добавок і клінкерних реліктів [5]. Запропоновано залежності граничної повзучості від співвідношення гелю та кристалогідратів, водоцементного відношення, коефіцієнтів розсунення зерен дрібного та крупного заповнювачів, а також кінетичні залежності розвитку деформації повзучості [6]. Обґрунтовані теоретично та підтверджені експериментально залежності добре узгодилися з результатами обстежень споруд [7], що дало змогу використати їх у



розрахунках конструкцій методом скінчених елементів [8], розробити на їхній основі заходи зі зменшення усадки [9].

Типова крива усадки цементного каменю в умовах квазістатичного сушіння зображена на рис. 1.

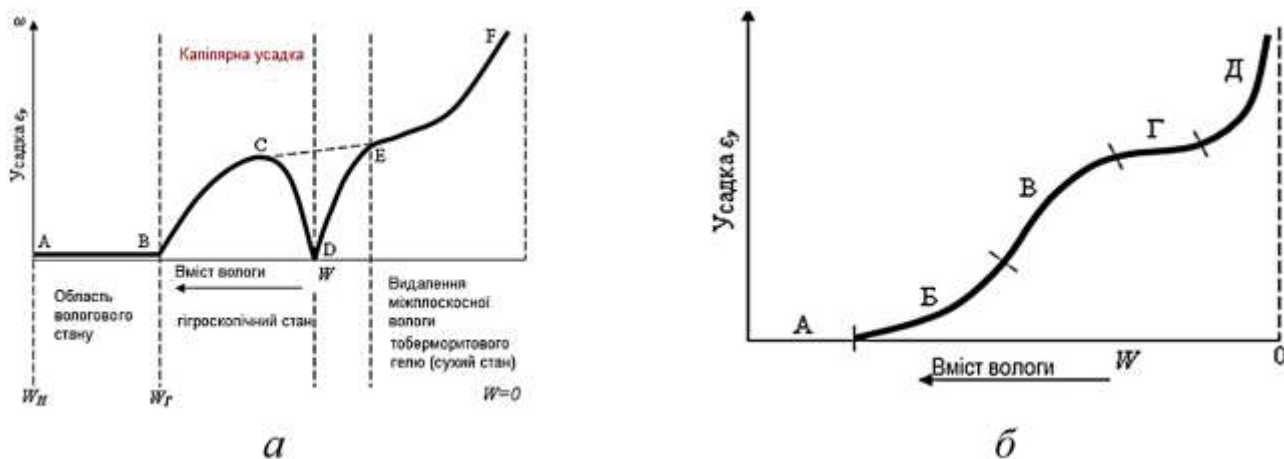


Рис. 1. Криві усадки цементного каменю:  
 а – типова усадка цементного каменю;  
 б – експериментально отримана З. М. Цілоسانی [10]

Максимальний вміст вологи цементного каменю, що твердів у воді 28 днів, відповідає точці на осі абсцис на початку координат і виражається математичною залежністю

$$W_{\text{макс}} = \frac{\rho_p}{\rho_0} \int_{r_{\text{мін}}}^{r_{\text{макс}}} f_V(r) dr, \quad (1)$$

де  $\rho_0$  – середня густина цементного каменю в сухому стані;

$\rho_p$  – густина рідини.

Спочатку відбувається видалення вологи з пор і великих капілярів з радіусом більше 0,1 мкм (більше 1000 Å), при цьому не відбувається зменшення об'єму цементного каменю та його усадки. Цей етап сушіння супроводжується постійною швидкістю випаровування вологи з таких капілярів за будь-якої відносної вологості повітря, оскільки тиск насиченої водяної пари в капілярах практично не відрізняється від тиску насиченої водяної пари над плоскою поверхнею. Видалення вологи з капілярів з радіусами менше

0,1 мкм (менше 1000 Å) призводить до усадки цементного каменю (рис. 1, а, ділянка В-С), викликаній зменшенням об'єму вологи цементного каменю. Така усадка викликана дією капілярного тиску, що виникає в капілярах цементного каменю, у яких вода утворює меніски. Капілярний тиск  $p$  в одиничному капілярі пов'язаний з поверхневим натягом  $\sigma_{12}$  залежністю

$$p = \frac{2\sigma_{12}}{r}. \quad (2)$$

Чим нижче відносна вологість навколишнього повітря, тим менше радіус капілярів, у яких утворюються меніски, і тим вищий капілярний тиск.

Капілярний тиск, радіус капіляра на рівні меніска рідини та відносна вологість повітря пов'язані між собою таким рівнянням:

$$p = \frac{2\sigma_{12}}{r} = 1300 \ln \left( \frac{1}{\varphi} \right). \quad (3)$$

Оскільки мікрокапіляри розсіяні по об'єму цементного каменю, то капілярний тиск взаємно врівноважується і призводить до усадки. Оскільки капілярні сили є зовнішніми відносно каркаса цементного каменю, це можна описати рівнянням

$$\delta = \frac{\omega_n}{E_v} = 1300 \ln \left( \frac{1}{\varphi} \right), \quad (4)$$

де  $E_v$  – модуль пружності цементного каменю при всебічному стисканні;

$\omega_n$  – відношення площі змочених пір до всієї площі зразка.

Отже, усадка цементного каменю під дією капілярних сил тим більше, чим менші відносна вологість повітря і модуль пружності цементного каменю і більша площа капілярів, у яких утворюються меніски. Капілярний тиск змінюється зі зменшенням вмісту вологи цементного каменю монотонно, спочатку зростає, потім, досягнувши максимального значення, починає зменшуватися. Чим менший радіус капілярів, тим вищий капілярний тиск (при одній і тій самій капілярній пористості) і тим при меншій відносній вологості навколишнього повітря він досягає свого максимального значення. Зменшення капілярного тиску призводить до об'ємного розширення цементного каменю внаслідок пружного відновлення твердого каркаса через зменшення всебічного стиснення, викликаного дією капілярних сил. Цей період сушіння відповідає ділянці С–D (рис. 1, а), коли подальше зменшення вмісту вологи цементного каменю супроводжується не зменшенням, а збільшенням його об'єму. Проте експериментально З. М. Цілоسانی показав [10], що в умовах висушування, максимально близьких до квазістатичних, збільшення об'єму не спостерігалось, хоча і фіксувався на ділянці Г (рис. 1, б), де висушування не супроводжується усадкою цементного каменю.

У роботах Калоузека [11] показана роль міжплощинної води тоберморитового

гелю в процесі усадки цементного каменю, тобто чим менша відносна вологість повітря і вище температура, тим більше міжплощинної води видаляється з тоберморитового (на відміну від ксонотлітового) гелю і тим вище усадка цементного каменю.

Отже, причиною усадки бетону в початковий період твердіння є зменшення гелю цементного каменю, кількості вільної води, яка витрачається на випаровування і гідратацію цементу. Потім витрачається напівзв'язана вода (плівкова вода), яка оточує частинки гелю. Це викликає зближення частинок гелю та подальшу усадку. Крім того, капілярний тиск у порах має дуже значну величину і зростає зі зменшенням їхніх розмірів. Оскільки мікропори розсіяні в цементному камені в різних напрямках, то тиск, взаємно врівноважуючись, діє як всебічне стискування, під впливом якого також відбуваються об'ємні деформації. При подальшому висиханні бетону зменшується вологісний градієнт, кристалічні зростки, що ростуть, надають все більший опір внутрішньому тиску, і деформація усадки поступово згасає.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Отже, чим інтенсивніше процеси гідратації цементу і більше кристалогідратів утворюється в більш ранні терміни твердіння, тим раніше буде чинитися опір всебічному стиску в ньому, і, як наслідок, підвищується тріщиностійкість покриття і міцність його зчеплення зі «старим» бетоном.

Усадка гідроізоляційного складу проникної дії аналогічна усадці бетону і, крім перерахованих вище факторів, також істотно залежить від виду та кількості заповнювачів, оскільки в умовах квазістатичного сушіння наявність заповнювача перешкоджає вільній усадці цементного каменю. Усадка бетону (відносна деформація)  $\varepsilon_y^b$  становить частину усадки цементного каменю  $\varepsilon_y^u$  і залежить від кількості введеного заповнювача:

$$\varepsilon_y^{\delta} = \varepsilon_y^{\Pi}(1 - a)^n, \quad (5)$$

де  $a$  – об’ємна частка заповнювача;  
 $n$  – емпіричний коефіцієнт, що знаходиться в межах від 1,2 до 1,7.

Було отримано залежності впливу усадки бетону від вмісту та виду різних заповнювачів (рис. 2, 3).

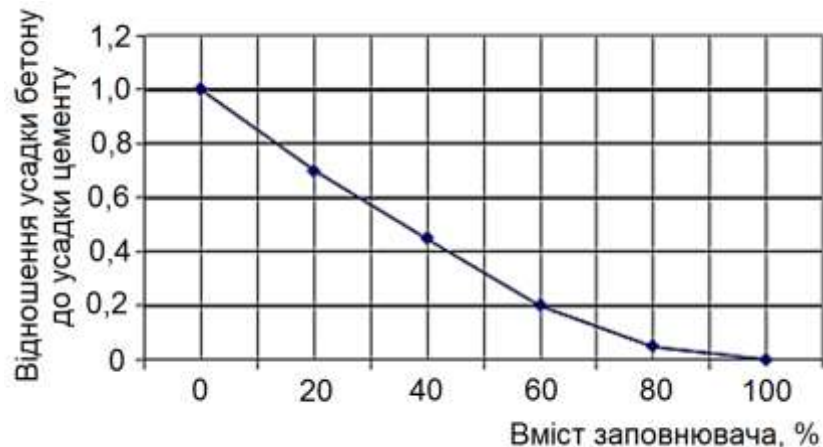


Рис. 2. Вплив вмісту заповнювача за об’ємом на відношення усадки бетону до усадки цементного каменю ( $n = 1,7$ )

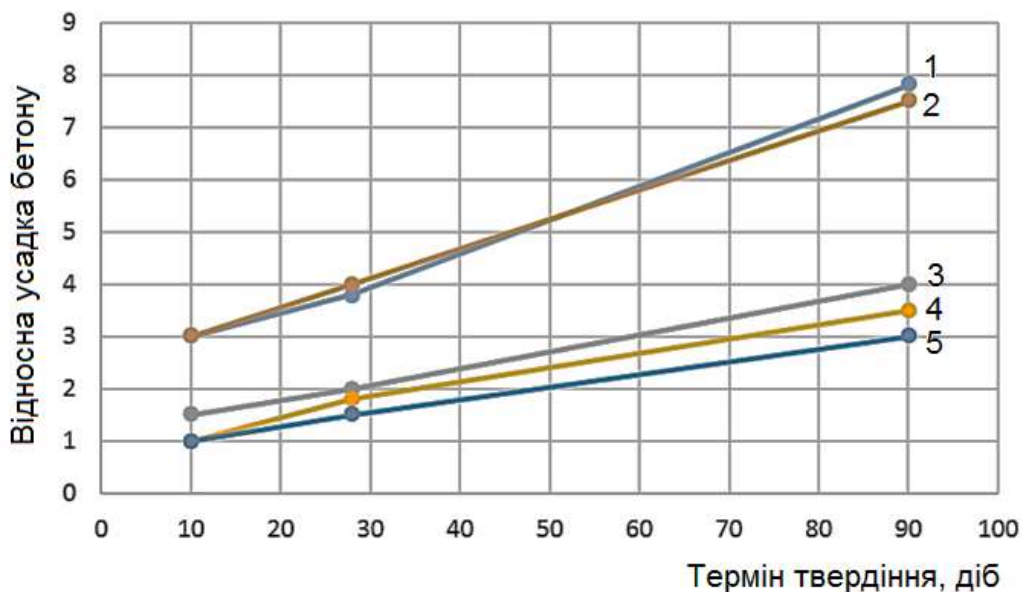


Рис. 3. Усадка бетону на різних заповнювачах:  
 1 – пісковик; 2 – гравій; 3 – граніт; 4 – вапняк; 5 – кварц

З рис. 2 видно, що зменшення усадки бетону тим менше, чим менше у складі цементу і більше заповнювача. На рис. 3 показано, що і властивості заповнювача, а

саме величина модуля пружності, також істотно впливають на величину усадки бетону. При цьому величина деформації бетону знаходиться у зворотній залежності

від величини модуля пружності заповнювача. З рис. 3 видно, що найбільш оптимальними для бетонів (найменша величина усадки при твердінні) як заповнювачі є кварц і вапняк, що також підтверджується дослідженнями інших авторів [12–14].

*Метою роботи* є зниження усадкових напруг у дрібнозернистому бетоні, що сприятиме підвищенню міцності зчеплення нового і «старого» бетонів. Для цього при розробленні гідроізоляційних складів проникної дії слід забезпечити додатковий синтез кристалогідратів у порах і капілярах цементного каменю в початковий період гідратації цементу через додавання певних солей електролітів; крім кварцового заповнювача, ввести до складу тонкодисперсний карбонатний наповнювач.

**Основна частина дослідження.** Для проведення експериментальних досліджень було отримано суху суміш з урахуванням викладеного вище.

Введені до складу хімічні добавки другого класу (за систематизацією В. Ратінова і Ф. Іванова): хлориди кальцію, натрію і калію, азотнокислий кальцій, карбонат калію тощо, здатні реагувати з трикальцієвим алюмінатом і чотирикальцієвим алюмоферитом з утворенням важкорозчинних подвійних гідратів. Слід урахувати, що першою буде реагувати та добавка, яка з цими складовими цементу утворює найбільш важкорозчинні солі, сприяє найбільшому пересиченню і тому кристалізується з максимальною швидкістю. Подібні властивості в цементі має гідросульфоалюмінат кальцію (можливо, також гідросульфоалюмоферит кальцію), що кристалізується при взаємодії алюмінієвмісних складових цементу з гідроксидом кальцію і сульфатами. Поки протікають ці реакції, інші добавки, введені в бетон з водою замішування, наприклад  $\text{CaCl}_2$  і  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ , очікують своєї черги, тобто залишаються в рідкій фазі цементного тіста і цементного каменю у

вигляді відповідних іонів і завдяки цьому прискорюють твердіння силікатних складових цементу, оскільки в цей час вони змінюють розчинність силікатів кальцію, тобто діють на них як добавки першого класу (не містять однойменних з в'язучим іонів, але прискорюють твердіння за рахунок зміни іонної сили розчину, наприклад  $\text{NaCl}$ ,  $\text{NaNO}_2$ ). Оскільки в цементі обов'язково міститься гіпс, будь-яка добавка з перерахованих вище не вступає в реакцію з алюмінієвими складовими цементу доти, поки цей гіпс практично повно не зв'яжеться у важкорозчинний гідросульфоалюмінат кальцію (етрингіт). Така взаємодія можлива, якщо після утворення етрингіту залишаються непрореаговані з сульфат-іонами трикальцієвий алюмінат і чотирикальцієвий алюмоферит.

Для отримання гідроізоляційного складу проникної дії до цементно-піщаної суміші було додано тонкодисперсний порошок карбонату кальцію з питомою поверхнею  $1500 \text{ см}^2/\text{г}$ . Шляхом перемішування цементу, кварцового заповнювача, карбонатного наповнювача та комплексу хімічних добавок було виготовлено суху суміш.

Для проведення досліджень було вирізано зразки у вигляді кернів з основи шляхопроводу (рис. 4). Зразки розрізали по висоті кернів на диски товщиною по 30 мм. Зразок № 1 являв собою верхній шар основи шляхопроводу і мав зернисту поверхню, два інші зразки-диски, вирізані з наступних шарів, мали гладку щільну бетонну поверхню (рис. 5).

Отримали зразки-диски товщиною 30 мм, на кожен зразок були нанесені склади сухої гідроізоляційної суміші проникної дії та цементно-піщаного розчину. Зразки тверділи в нормально-вологісних умовах протягом 28 діб, поверхня зразків залишилася гладкою та не мала тріщин, після чого на кожен із складів були наклеєні за допомогою епоксидного клею металеві грибки (рис. 6).



Рис. 4. Зразок керна з зернистою поверхнею



Рис. 5. Зразок керна з гладкою поверхнею, після зрізання верхнього зернистого шару



Рис. 6. Зразки-диски з наклеєними металевими грибками

Після витримування протягом трьох діб зразки були випробувані на міцність зчеплення шару гідроізоляційного складу зі «старим» бетоном. Як прилад для фіксації зусилля відриву грибка застосовувався динамометр з поділкою 0,05 кг і максимальним прикладеним навантаженням 60 кг.

Результати відриву шару гідроізоляційного складу показали:

- міцність відриву від зернистої поверхні 2,6 МПа;
- міцність відриву від гладкої поверхні 2,4 МПа.

Для цементно-піщаного розчину:

- міцність відриву від зернистої поверхні 0,8 МПа;
- міцність відриву від гладкої поверхні 0,5 МПа.

За результатами механічних випробувань можна стверджувати, що теоретичні дослідження про зниження усадкових напруг у твердіючому

дрібнозернистому бетоні призводить до підвищення міцності зчеплення зі «старим» бетоном.

У результаті досліджень методами рентгенофазового та диференційно-термічного аналізу цементного каменю встановлено таке: добавка карбонатного наповнювача підвищує вміст кальциту в цементному камені, викликає утворення шестикальцієвого трикарбонатного гідроалюмінату, близького за структурою еtringіту, але уповільнює утворення самого еtringіту. Крім того, ця добавка сприяє кращій кристалізації гідросилікатів кальцію типу тобермориту і  $C_2SH_2$ . Уведення комплексу хімічних добавок другого класу сприяє загальному підвищенню ступеня гідратації з утворенням більшої кількості портландиту, гідросилікатів кальцію типу тобермориту і ксонотліту і комплексних гідроалюмінатів кальцію – гідронітроалюмінату і гідрохлоралюмінату. Комплекс мінеральної

та хімічних добавок також сприяє підвищенню ступеня гідратації, збільшенню вмісту кальциту, імовірно, за рахунок присутності карбонатного наповнювача та збільшення вмісту еtringіту. З комплексних гідратних новоутворень

зафіксовано гідронітроалюмінат кальцію, гідрооксихлорид кальцію та шестикальцієвий трикарбонатний гідроалюмінат. Наявність новоутворень було підтверджено електронно-мікроскопічними дослідженнями (рис. 7).

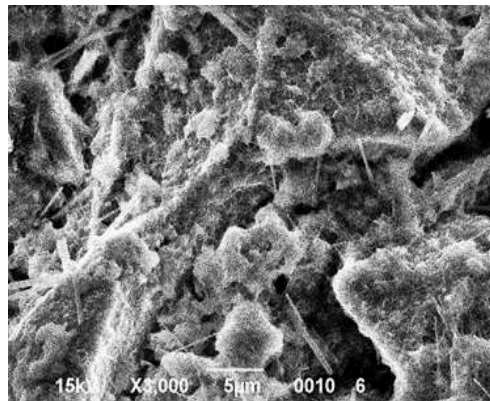
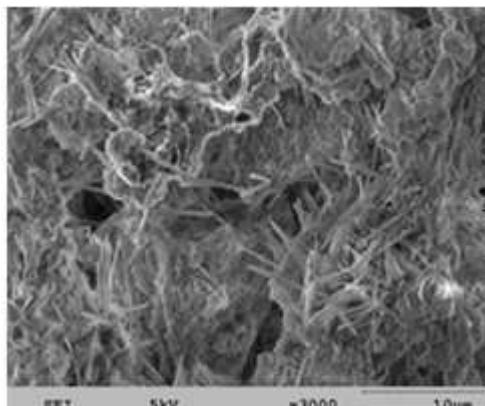


Рис. 7. Електронно-мікроскопічні дослідження продуктів гідратації цементного каменю гідроізоляційного складу

На рис. 7 видно продукти гідратації, у складі яких є голкоподібні кристали довжиною до 5 мкм, характерні для еtringіту, гідрокарбоалюмінату і гідрохлоралюмінату кальцію, а також повстані новоутворення низькоосновних гідросилікатів кальцію та нарости з кальциту.

**Висновки.** Встановлено, що ущільнення гідроізоляційного складу, яке сприяє зменшенню внутрішніх напруг при твердінні і, отже, збільшує величину зчеплення його зі «старим» бетоном, досягається шляхом уведення тонкомолотого наповнювача карбонату кальцію та комплексу хімічних

водорозчинних добавок другого класу. Мінеральний наповнювач і хімічні добавки дають змогу додатково синтезувати при гідратації цементу в його порах і капілярах еtringіт, гідрокарбоалюмінат і гідрохлоралюмінат кальцію, низькоосновні гідросилікати кальцію, кальцит.

Розроблений гідроізоляційний склад проникної дії у вигляді будівельної суміші має високі показники адгезійної міцності до «старого» бетону і може призначатися для застосування в ремонтних, відновлювальних роботах і захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд від зовнішніх впливів, пов'язаних з водним середовищем.

#### Список використаних джерел

1. Александровский С. В. Расчет бетонных железобетонных конструкций на изменения температуры и влажности с учетом ползучести. Изд. 2-е. Москва: Стройиздат, 1973. 432 с.
2. Дорофеев В. С., Пушкар Н. В. Міцність дотичного зчеплення між старим і новим бетонами у збірно-монолітних конструкціях. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*. 2019. Вип. 11. С. 21-30.

3. Мазурак А. В., Калітовський В. М., Юхим М. Я., Мазурак Т. А. Методика експериментальних досліджень залізобетонних балок, виготовлених і підсилених торкретуванням / Львівський національний аграрний університет. URL: <http://dorogimosti.org.ua/files/upload/31.pdf> (дата звернення 01.11.2023).
4. Бліхарський З. Я., Хміль Р. Є., Вашкевич Р. В., Васільєв І. В. Дослідження з'єднувальних сумішей для нарощування поперечного перерізу підсилених залізобетонних балок / НУ «Львівська політехніка». URL: [https://vlp.com.ua/files/02\\_44.pdf](https://vlp.com.ua/files/02_44.pdf) (дата звернення 01.11.2023).
5. Plugin A. N., Wang X., Plugin A. A., Kalinin O. A., Miroshnichenko S. V. The Long-Time Creep and Durability of the Concrete and Reinforced Concrete. 11-th International Congress of the Chemistry of Cement, Durban, South Africa, 308 (2003) 1761-1772. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331534209\\_The\\_Long-Time\\_Creep\\_and\\_Durability\\_of\\_the\\_Concrete\\_and\\_Reinforced\\_Concrete](https://www.researchgate.net/publication/331534209_The_Long-Time_Creep_and_Durability_of_the_Concrete_and_Reinforced_Concrete) (дата звернення 01.11.2023).
6. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; под ред. А. Н. Плугина. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: [https://www.researchgate.net/publication/331533663\\_Fundamentals\\_of\\_the\\_theory\\_of\\_hardenig\\_strength\\_destruction\\_and\\_durability\\_of\\_Portland\\_cement\\_concrete\\_and\\_structures\\_made\\_of\\_them\\_Vol3\\_Theory\\_of\\_strength\\_destruction\\_and\\_durability\\_of\\_concrete\\_reinf](https://www.researchgate.net/publication/331533663_Fundamentals_of_the_theory_of_hardenig_strength_destruction_and_durability_of_Portland_cement_concrete_and_structures_made_of_them_Vol3_Theory_of_strength_destruction_and_durability_of_concrete_reinf) (дата звернення 01.11.2023).
7. Плугин А. А., Плугин А. М., Кудренко С. М., Плугин Д. А. Понаднормативна довгочасна повзучість бетону в залізобетонній конструкції місткісної споруди. *Зб. наук. праць ХарДАЗТ*. Харків: ХарДАЗТ, 2000. Вип. 37. С. 32-44.
8. Lobiak A., Plugin A., Kravtsiv L., Kovalova O. Modelling of motorway bridge spans under modernization with consideration of rheological properties of the materials. *Matec Web of Conferences*, 234 (2018) 04004. URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201823404004> (дата звернення 01.11.2023).
9. Плугин А. А., Костюк Т. А., Салия М. Г., Бондаренко Д. А. Применение карбонатных минеральных добавок для снижения усадки цементных растворов. *Научный вестник строительства*. 2010. № 59. С. 157-162.
10. Цилосани З. Н. Усадка и ползучесть бетона. Тбилиси: Мецнииреба, 1979. 230 с.
11. Kalousek O. L. Fundamental factors in the drying Shrinkage of concrete block. *JACI*. 1954. Vol. 26, № 3. P. 233-248.
12. Bendz Dale P., Garfodzi Edward J. Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone. *ACI Mater. J.* 1991. Vol. 88, № 8. P. 518-529.
13. Roberts L. R., Grace W. R. Microsilica in concrete.1. *Mater. Sci. Concr.1*. Westerville (Ohio), 1989. P. 197-222.
14. Sarkar Shendeep L. Microstructure of a very low water/cement silica fume concrete. *Microscope*. 1990. Vol. 38, № 2. P. 141-152.

---

Костюк Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Тел.: +38(050)6528219. E-mail: [takostuk@ukr.net](mailto:takostuk@ukr.net).

Плугин Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38(057)7301058. E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Плугин Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: [plugin.da@kart.edu.ua](mailto:plugin.da@kart.edu.ua).

---

Макаренко Ольга Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-4125-2365. Тел.: +38(050)6056276. E-mail: olga.fxm@gmail.com.

Бондаренко Олександр Іванович, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд і гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486. Тел.: +38(050)6518773. E-mail: oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua.

Деденьова Олена Борисівна, старший викладач кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792. Тел.: +38(097)414-12-24. E-mail: alena.dedenyova@gmail.com.

Kostyuk Tetiana, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Tel.: +38(050)6528219. E-mail: takostuk@ukr.net.

Plugin Andrii, Professor, Head of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38(057)7301058.

E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63.

E-mail: plugin.da@kart.edu.ua.

Makarenko Olha, PhD (Tech), Department of Materials Science and Engineering of Composite Structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-4125-2365.

Тел.: +38(050)6056276. E-mail: olga.fxm@gmail.com.

Bondarenko Oleksandr, PhD (Tech), Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydraulic Engineering O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486.

Тел.: +38(050)6518773. E-mail: oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua.

Dedenova Olena, Senior Lecturer, Department of Materials Science and Engineering of Composite Structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792.

Тел.: +38(097)4141224. E-mail: alena.dedenyova@gmail.com.

Статтю прийнято 23.11.2023 р.

**УДК 666.972.16**

## **ВИВЧЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ ЦЕМЕНТОБЕТОНІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ПЛАСТИФІКАТОРІВ І БАЗАЛЬТОВОГО ВОЛОКНА**

**Канд. техн. наук О. Ю. Дорошенко**

## **STUDYING THE PROPERTIES OF FINE-GRAINED CEMENT CONCRETE USING PLASTICIZERS AND BASALT FIBER**

**PhD (Tech.) A. Doroshenko**

***Анотація.** У статті розглянуто експериментально-теоретичне обґрунтування використання базальтового волокна як перспективного матеріалу, за допомогою якого можна отримати новий клас будівельних матеріалів. Виявлено характер залежності властивостей цементобетону від способу введення термообробленого волокна та виду пластифікатора. Розроблено склади дрібнозернистого бетону з використанням термообробленого базальтового волокна, що дають змогу одержувати матеріали класом В25...В60 за міцністю під час стиснення; Вtb2,8...Вtb6,0 за міцністю під час вигину; морозостійкістю не менше F300. Аналіз мікроструктурних особливостей фібробетону з*



армувальним базальтовим мікрОВОЛОКНОМ свідчить про те, що модифіковане волокно в цементній матриці виконує покладену на нього функцію завдяки зміні властивостей його поверхні. Волокно виступає як підкладка для активної кристалізації продуктів гідратації клінкерних мінералів, що сприяє підвищенню адгезії продуктів гідратації в'язучого до фібри. Це відбувається за рахунок підвищеної лугостійкості порівняно з необробленим волокном, а отже, його стабільності та міцності в умовах агресивного середовища цементного тіста, а також за рахунок відносно більшої активності. Зазначені обставини, вочевидь, і є основними причинами підвищення міцності на вигин композитних матеріалів (бетонів) із використанням досліджуваних цементних систем.

**Ключові слова:** базальтове волокно, мікроармувальні компоненти, суперпластифікатори, хімічний склад, фізико-механічні характеристики, бетон, транспортне будівництво.

**Abstract.** The article deals with the experimental and theoretical substantiation of the use of basalt fiber as a promising material that can be used to produce a new class of building materials. The nature of the dependence of cement concrete properties on the method of introducing heat-treated fiber and the type of plasticizer is revealed. The most effective is the preliminary loosening of the fiber in the mixing water in the presence of a naphthalene-formaldehyde superplasticizer, followed by the introduction of the suspension into the molding mixture. Adsorption of the plasticizer on the surface of the fiber leads to hydrophilization of its surface, which contributes to the uniform distribution of the fiber throughout the mixture and, as a result, increases the strength of the concrete. The use of the naphthalene-formaldehyde additive SP-1 makes it possible to increase the compressive strength by 10% and the flexural strength by 21% compared to formulations based on the polycarboxylate plasticizer Sika Visco Crete.

The compositions of fine-grained concrete using heat-treated basalt fiber have been developed, which make it possible to obtain materials with class B25...B60 in terms of compressive strength; Btb2.8...Btb6.0 in terms of bending strength; frost resistance not less than F300.

The analysis of the microstructural features of fiber concrete with reinforcing basalt microfiber shows that the modified (heat-treated at 500 °C) fiber in the cement matrix performs its function due to changes in its surface properties. The fiber acts as a substrate for the active crystallization of clinker minerals, which helps to increase the adhesion of binder hydration products to the fiber. This is due to the increased alkali resistance compared to untreated fiber, and, consequently, its stability and strength in the aggressive environment of cement batter, as well as due to its relatively higher activity. These circumstances are obviously the main reasons for the increase in the flexural strength of composite materials (concretes) using the studied cement systems.

**Keywords:** basalt fiber, microreinforcing components, superplasticizers, chemical composition, physical and mechanical characteristics, concrete, transport construction.

**Вступ.** Нині до перспективних способів підвищення характеристик міцності матеріалів належить дисперсне армування. Для цього використовують широкий спектр армувальних компонентів. При цьому ефективність дисперсного армування бетону і будівельних розчинів безпосередньо залежить від правильного вибору виду волокон відповідно до

функціонального призначення армованого матеріалу [1-3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У 1960-х роках були проведені перші дослідження базальтового волокна. Ці дослідження показали, що базальтове волокно має ряд унікальних властивостей, таких як висока міцність, хімічна стійкість і стійкість до корозії. Ці властивості роблять

базальтове волокно перспективним матеріалом для армування бетонних конструкцій.

Базальтове волокно може використовуватися для армування бетонних конструкцій у різних галузях, таких як будівництво мостів, тунелів, гребель і злітно-посадкових смуг. Цей матеріал може замінити металеву арматуру, схильну до корозії в агресивних середовищах.

Крім того, базальтове волокно може використовуватися для виробництва інших будівельних матеріалів, таких як облицювальні суміші та армувальні сітки. Цей матеріал має широкий спектр застосування та може використовуватися для створення нових класів будівельних матеріалів [4, 5].

Однією з причин, що стримують активне впровадження мікроармувальних матеріалів різного призначення, є відсутність нормативів для проектування. Було проаналізовано нормативні документи, що регламентують використання фібри в будівельних матеріалах [6, 7].

У результаті встановлено, що чинні нормативи не містять чітких рекомендацій щодо використання різних видів армувальних волокон для бетонів різного функціонального призначення.

Європейські норми [8, 9] чітко поділяють армувальні волокна на класи за основним типом дії, серед яких фібри для поліпшення пластичних властивостей, експлуатаційних характеристик, міцності на вигин. Однак ці документи стосуються тільки сталеві та полімерної фібри.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Розроблення та дослідження властивостей ефективного дрібнозернистого цементобетону з використанням базальтового волокна як мікроармувального компонента і суперпластифікатора для транспортного будівництва.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися такі завдання:

- виявити характер залежності властивостей цементобетону від способу

введення термообробленого волокна та виду пластифікатора;

- розробити склади дрібнозернистого бетону з використанням термообробленого базальтового волокна та суперпластифікатора;

- проаналізувати мікроструктурні особливості фібробетону з армувальним базальтовим мікроволокном і суперпластифікатором.

**Основна частина дослідження.** Для відбору базальтового волокна, найбільш придатного для армування цементної матриці, враховуючи широту географії застосування волокна в будівельній галузі та обсяги будівництва доріг на території України, що постійно зростають, проаналізовано волокна найбільших виробників базальтової фібри.

При проектуванні мікроармуваних матеріалів мають значення також геометричні характеристики волокна. Для досягнення оптимального пластично-агрегатного стану мікроармувального компонента в суміші слід відбирати вихідні компоненти з оптимальним співвідношенням довжини і діаметра більше 10. Фібра виробництва ТОВ «Армбуд» характеризується необхідним співвідношенням геометричних характеристик [10, 11].

Були використані такі матеріали: портландцемент марки 400, пісок з модулем крупності 1,5, термооброблене базальтове волокно і вода. Розрахунок складу бетону проводили виходячи з його класу за міцністю при стисненні – В42,5.

Склад бетонної матриці було прийнято в таких співвідношеннях: Ц:П = 1:1,76; В/Ц = 0,37; як суперпластифікатор використовували добавку СП-1.

Наступним етапом роботи було розроблення складів дрібнозернистого бетону з урахуванням досягнення ефекту максимального розподілу мікроармувального компонента. За літературними даними, існує два способи розподілу волокна в системі: сухий і гідророзпушення [4, 5].

Для визначення оптимального способу введення волокна в цементну суміш у роботі було проаналізовано обидва методи. При приготуванні розчину першим способом усі сухі компоненти, включно з базальтовим волокном, засипали в змішувач і перемішували. Згодом у змішувач додавали необхідну воду замішування. При використанні сухого методу спостерігалось механічне пошкодження волокон, що значно знижує його техніко-експлуатаційні характеристики.

Кращого розподілу волокон вдалось досягти з використанням методу гідророзпушення. При цьому способі волокно перемішується у воді замішування, що сприяє більш рівномірному його розподілу. Далі суспензію додають у суміш цементу і піску. Однак у цьому разі при подальшому перемішуванні всіх компонентів спостерігається формування так званих «їжаків», тобто злипання окремих волокон у пучки.

У зв'язку з цим було запропоновано комплексний метод введення волокна і розглянуто три способи отримання цементобетону.

**Перший спосіб** – усі компоненти одночасно завантажуються в змішувач.

**Другий спосіб** – попередній розподіл волокна у воді замішування за наявності добавки з подальшим введенням суспензії до формувальної суміші.

**Третій спосіб** – розпушення волокон у воді з подальшим змішуванням усіх компонентів бетонної суміші, включно з пластифікатором.

Для створення заданої рухливості в роботі використовувалися суперпластифікатори СП-1 і Sika Visco Crete. Аналіз отриманих результатів (рис. 1) дає змогу зробити висновок про істотний вплив способу введення волокна і виду пластифікатора на фізико-механічні властивості дрібнозернистого бетону.

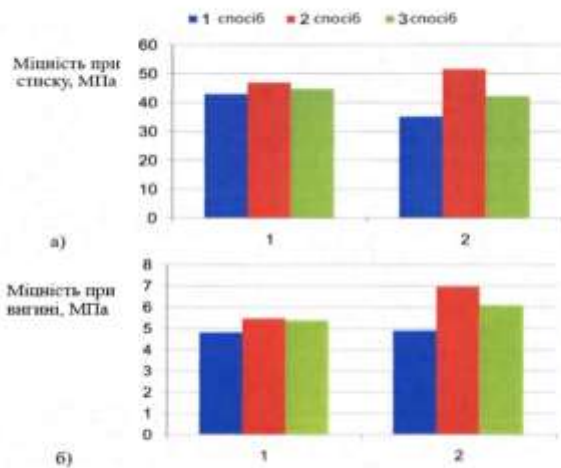


Рис. 1. Межа міцності при стисненні (а) і вигині (б) залежно від способу введення волокна і виду пластифікатора: 1 – Sika Visco Crete; 2 – СП-1

Попереднє розпушення волокна у воді замішування за наявності СП-1 (другий спосіб) призводить до підвищення міцності під час стиснення на 24 % і під час вигину на 30 % порівняно зі складами, отриманими

одночасним змішуванням усіх компонентів (перший спосіб). Це зумовлено адсорбцією пластифікатора на поверхні базальтового волокна та її гідрофілізацією, що призводить до формування оболонки на

поверхні волокон і рівномірного розподілу волокна спочатку у воді, а згодом у розчинній суміші.

При використанні пластифікатора Sika Visco Crete спостерігається незначна зміна характеристик міцності бетону незалежно від способу введення волокон. Використання добавки СП-1 дає змогу збільшити міцність при стисненні на 10 % і вигині на 21 % порівняно зі складами на основі пластифікатора Sika Visco Crete.

Цей ефект пов'язаний з хімічною природою; ефект пластифікації полікарбоксилатних добавок спостерігається тільки в суспензіях з лужним середовищем (наприклад середовище цементного розчину). За нейтрального середовища суспензії (у разі води замішування з перемішаним у ній волокном) ці пластифікатори не мають істотного впливу, тоді як нафталінформальдегідні добавки характеризуються своєю універсальністю і проявляють

пластифікуючі дії незалежно від водневого показника розчину, що і позначається на міцнісних властивостях складів.

У зв'язку з цим у подальших експериментах був прийнятий другий спосіб отримання матеріалу. Як пластифікатор використовували СП-1.

У процесі експерименту встановлено істотний вплив концентрації волокна в системі на характеристики міцності бетонів. Зокрема збільшення вмісту волокон з 5 до 7 % сприяє зростанню міцності при стисненні (рис. 2) з 50 до 57 МПа (на 12 %). Подальше збільшення волокна в системі недоцільне, оскільки призводить до зниження міцності. При цьому приріст міцності при стисненні для складів із вмістом волокон, що дорівнює 7 %, порівняно з контрольними складами становить 25 %, а порівняно зі зразками з використанням вихідного волокна без термообробки – 11 %.

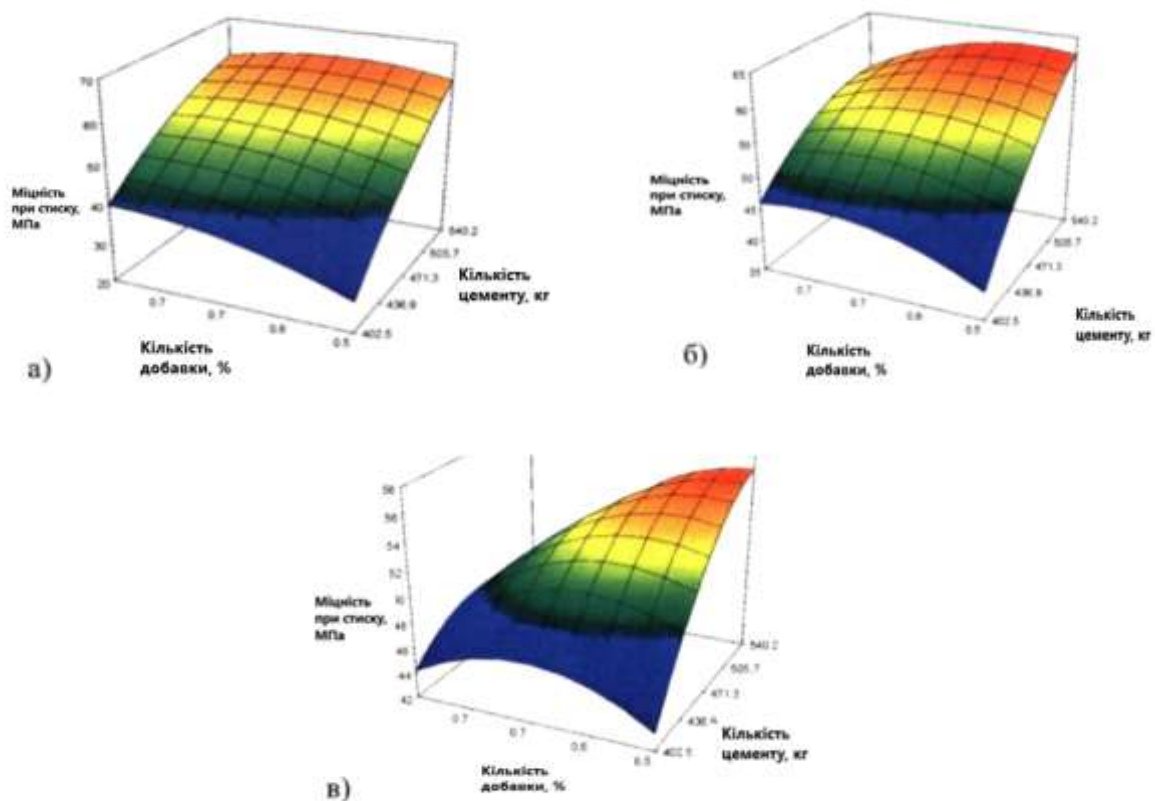


Рис. 2. Зміна межі міцності при стисненні мікроармованого дрібнозернистого цементобетону залежно від кількості волокна: а – 5 %; б – 7 %; в – 9 %

Зазначено особливості залежності міцності при вигині від кількості цементу, добавки і базальтового волокна (рис. 3). Так, максимальна міцність спостерігається на складах з використанням 7 % волокна і 0,8 % пластифікатора. Помітно зростає міцність порівняно з контрольними складами в 1,5 раза, а приріст міцності при порівнянні зі зразками з використанням

вихідного волокна без термообробки становить 9 %. При цьому так само слід урахувувати встановлену високу лугостійкість термообробленого базальтового волокна під час розрахунку довговічних конструкцій дрібнозернистого цементобетону, тоді як вихідне волокно матиме значний ступінь розчинення в процесі експлуатації.

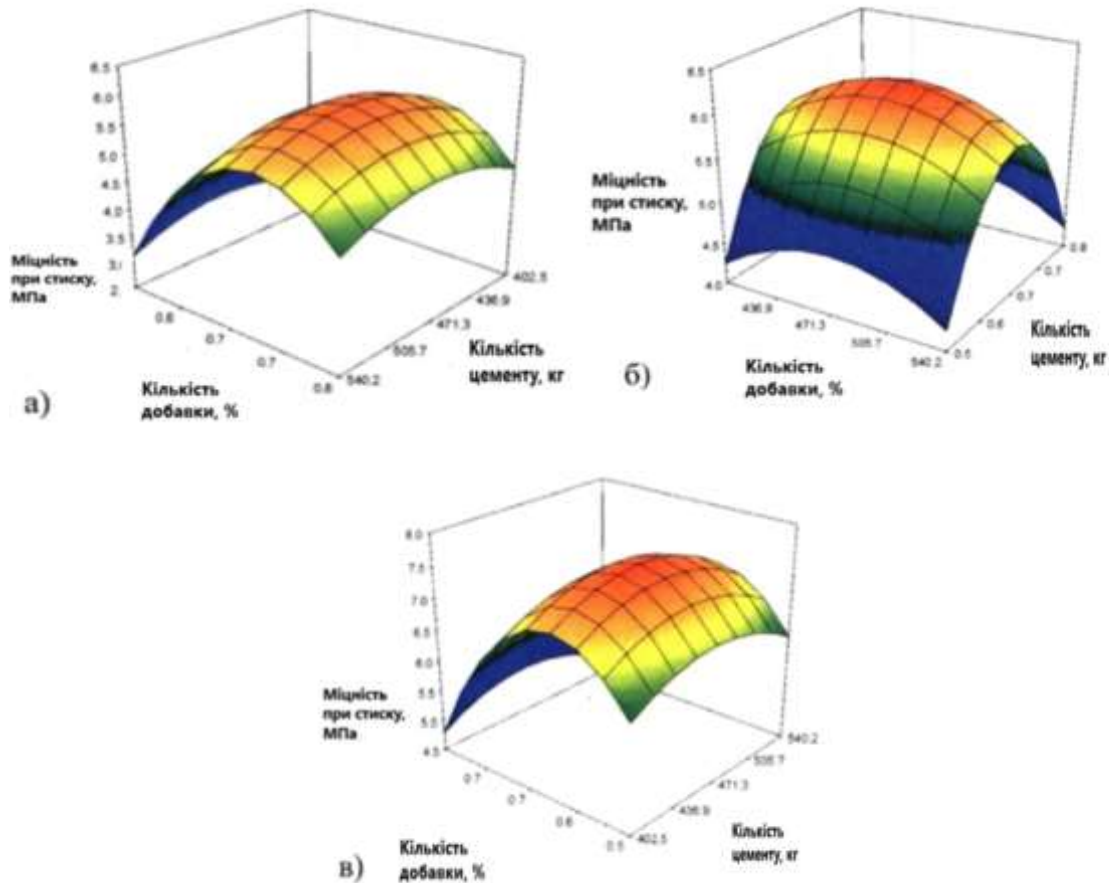


Рис. 3. Зміна межі міцності при вигині мікроармованого дрібнозернистого цементобетону залежно від кількості волокна: а – 5 %; б – 7 %; в – 9 %

Для всіх складів рекомендується використовувати вміст цементу  $480 \text{ кг/м}^3$ . У цьому разі матеріали, що розробляються, характеризуються необхідною міцністю під час стиснення і вигину без перевитрат сполучного компонента.

Аналіз результатів досліджень дав змогу запропонувати склади дрібнозернистого цементобетону з використанням

базальтового волокна як мікроармувальної добавки для транспортного будівництва (таблиця). Матеріали, отримані на основі цих складів формувальних сумішей, характеризуються високою якістю і техніко-експлуатаційними характеристиками, які багато в чому перевершують матеріали без волокна.

Склад і властивості дрібнозернистого цементобетону

Номер складу	Витрати матеріалів, кг/м <sup>3</sup>		Кількість добавки, %	В/Ц	Кількість мікроармувального компонента, %	Межа міцності при стисненні, МПа	Межа міцності при вигині, МПа	Клас бетону за міцністю на стиснення	Клас бетону за міцністю на вигин	Клас морозостійкості бетону
	цемент	пісок								
1	402	847	0,8	0,42	7	47,5	5,10	B35	Btb4,0	F300
2	480	847	0,8	0,4	7	56,3	6,4	B40	Btb4,4	F300
3	402	847	-	0,49	-	42,2	3,8	B30	Btb 3,2	F300
4	480	847	-	0,47	-	45,8	4,4	B35	Btb 3,6	F300

Корозійна стійкість і велика активність модифікованого базальтового волокна роблять його найважливішим структуроутворювальним компонентом одержуваного мікроармуваного цементобетону. Більша кількість кислотних брестедівських активних центрів на поверхні термообробленого волокна порівняно з необробленим сприяє кращій адгезії продуктів гідратації цементу до введеної анізотропної добавки (рис. 4, в, г). Водночас на поверхні вихідної фібри виразно проявляється хвиляста структура, яка є наслідком протікання корозійних процесів (рис. 4, б). Висока адгезія продуктів гідратації цементу до модифікованого волокна у великій кількості точок контакту цементного каменю та армувального компонента пояснює значне підвищення міцності на вигин (на 12 %) і стиснення (на 50 %) порівняно з необробленою фіброю.

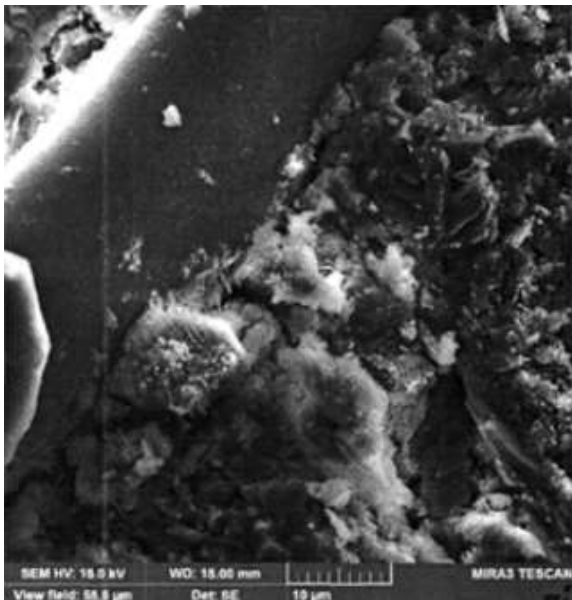
У матриці затверділого цементного каменю основну масу становлять рентгеноаморфні гідросилікати кальцію різного розміру від 100 нм до 1 мкм (рис. 5). Більшість із них зрослися в

агрегати, що дає змогу формувати доволі однорідну, монолітну і міцну структуру цементного каменю завдяки кристалізаційним контактам між окремими нанокристалітами гідросилікатів кальцію та іншими кристалогідратами системи. Зазначена обставина має позитивний вплив на характеристики міцності цементного композита.

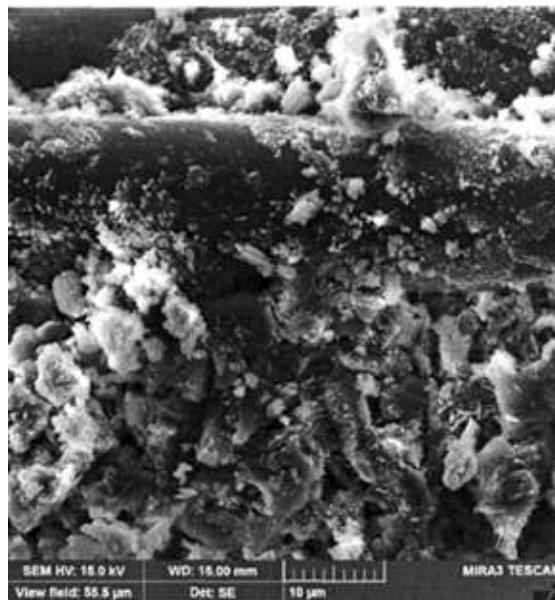
Отже, на підставі аналізу мікро-структурних особливостей фібробетону з армувальним базальтовим мікрволокном можна говорити про те, що модифіковане (термічно оброблене за температури 500 °С) волокно в цементній матриці виконує покладену на нього функцію завдяки зміні властивостей його поверхні. Волокно виступає як підкладка для активної кристалізації продуктів гідратації клінкерних мінералів, що сприяє підвищенню адгезії продуктів гідратації в'язучого до фібри. Це відбувається за рахунок підвищеної лугостійкості порівняно з необробленими волокнами, а отже, його стабільності та міцності в умовах агресивного середовища цементного тіста, а також за рахунок

відносно більшої активності. Зазначені обставини, вочевидь, і є основними причинами підвищення міцності на вигин

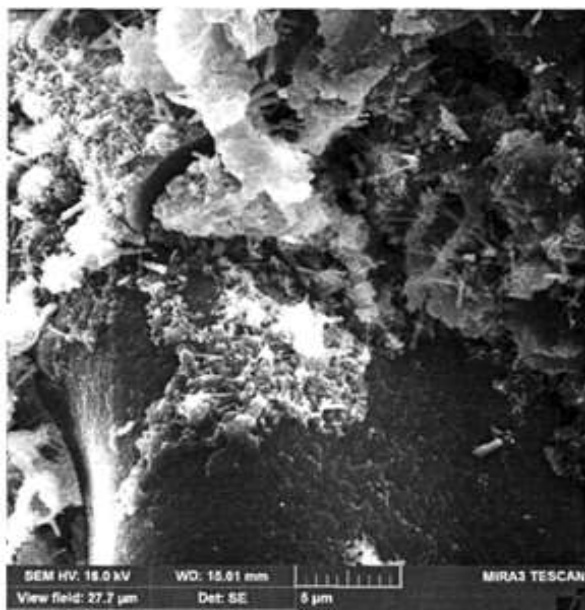
композитних матеріалів (бетонів) з використанням цементних систем.



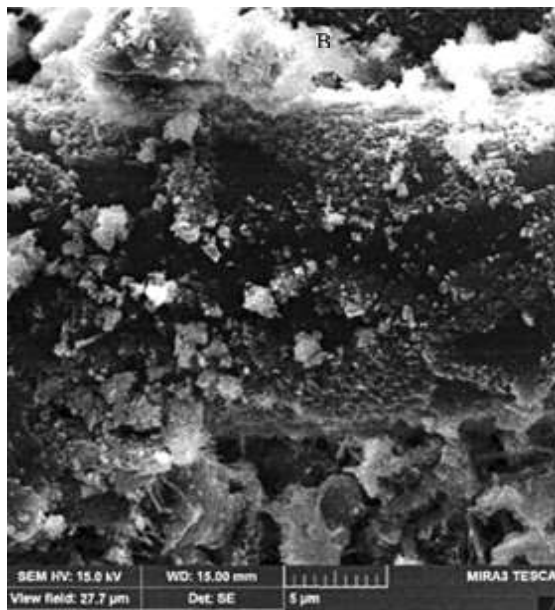
*a*



*б*



*в*



*г*

Рис. 4. Контактна зона між новоутвореннями і базальтовою мікрофіброю в структурі фібробетону у віці 28 діб:  
а, б – вихідне волокно; в, г – модифіковане волокно

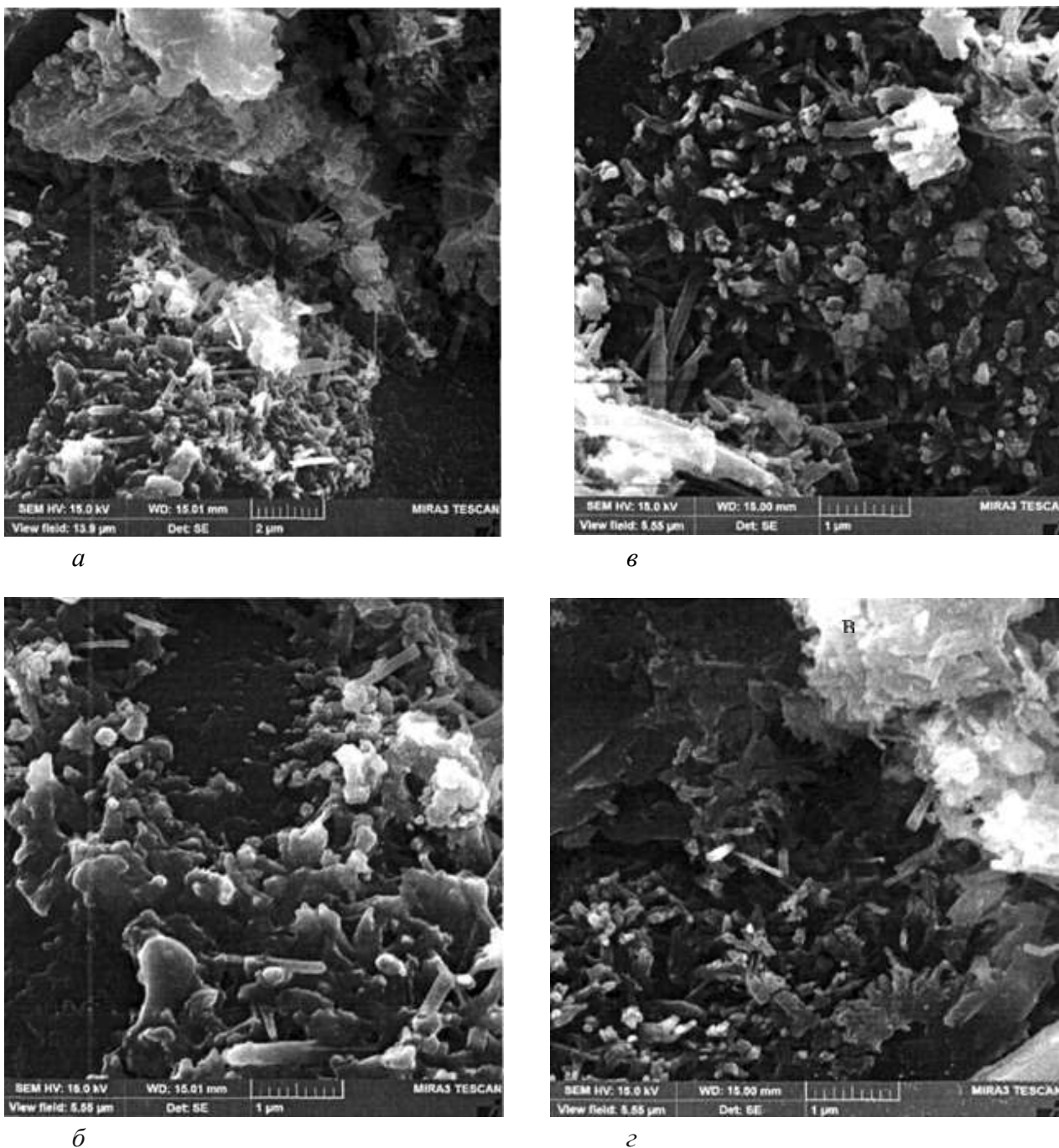


Рис. 5. Морфологія новоутворень у структурі фібробетону на основі волокна:  
а, б – необробленого; в, г – обробленого за температури 500 °С

### Висновки

1. Виявлено характер залежності властивостей цементобетону від способу введення термообробленого волокна та виду пластифікатора. Найефективнішим є попереднє розпушення волокна у воді

замішування в присутності нафталін-формальдегідного суперпластифікатора з подальшим введенням суспензії до формувальної суміші. Адсорбція пластифікатора на поверхні фібри призводить до гідрофілізації її поверхні, що



сприяє рівномірному розподілу волокна за об'ємом суміші і, як наслідок, підвищенню міцності бетону. Використання нафталін-формальдегідної добавки СП-1 дає змогу збільшити міцність під час стиснення на 10 % і вигину на 21 % порівняно зі складами на основі полікарбосилатного пластифікатора Sika Visco Créte.

2. Розроблено склади дрібнозернистого бетону з використанням термообробленого базальтового волокна, що дають змогу одержувати матеріали з класом В25...В60 за міцністю під час стиснення; Вtb2,8...Вtb6,0 за міцністю під час вигину; морозостійкістю не менше F300.

3. Аналіз мікроструктурних особливостей фібробетону з армувальним базальтовим мікрволокном свідчить про те, що модифіковане (термічно оброблене

за температури 500 °С) волокно в цементній матриці виконує покладену на нього функцію завдяки зміні властивостей його поверхні. Волокно є підкладкою для активної кристалізації продуктів гідратації клінкерних мінералів, що сприяє підвищенню адгезії продуктів гідратації в'язучого до фібри. Це відбувається за рахунок підвищеної лугостійкості порівняно з необробленим волокном, а отже, його стабільності та міцності в умовах агресивного середовища цементного тіста, а також за рахунок відносно більшої активності. Зазначені обставини, вочевидь, і є основними причинами підвищення міцності на вигин композитних матеріалів (бетонів) з використанням досліджуваних цементних систем.

### Список використаних джерел

1. Ary Subagia D. G., Kim Y., Tijing L. D., Kim C. S., Shon H. K. Effect of stacking sequence on the flexural properties of hybrid composites reinforced with carbon and basalt fibers, *Composites Part B: Engineering* 58. 2014. P. 251-258.
2. Dorigato A., Pegoretti A. Flexural and impact behaviour of carbon/basalt fibers hybrid laminates. *Journal of Composite Materials* 48. 2014. № 9. P. 1121-1130.
3. Lim J. II., Rhee K. Y., Kim H. J. and Jung D. H. Effect of stacking sequence on the flexural and fracture properties of carbon/basalt/epoxy hybrid composites. *Carbon Letters* 15. 2014. № 2. P. 125-128.
4. Khamees S. S., Kadhun M. M., Nameer A. A. Effects of Steel Fibers Geometry on the Mechanical Properties of SIFCON Concrete. *Civ. Eng. J.* 2020. 6. P. 21-33.
5. Ganesh A. C., Sowmiya K., Muthukannan M. Investigation on the effect of steel fibers in geopolymer concrete. *IOP Conf. Series: Mater. Sci. Eng.* 2020. 872. 012156.
6. ДСТУ-Н Б В.2.6-218:2016. Настанова з проектування та виготовлення конструкцій з дисперсноармованого бетону. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. 35 с.
7. СОУ 42.1-37641918-091:2013. Будівельні матеріали. Бетони дорожні, армовані базальтовою фіброю. Загальні технічні вимоги. Київ, 2013. URL: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=53110](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53110).
8. prEN 14889-1:2006. Fibres for concrete. Steel fibres. Definitions, specifications and conformity. PB 29.09.2006. 30 p.
9. prEN 14889-2:2006. Fibres for concrete. Polymer fibres. Definitions, specifications and conformity. PB 27.12.2006. 30 p.
10. Дорошенко О. Ю. Обґрунтування можливості використання базальтового волокна як компонента цементобетону для транспортного будівництва. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2021. Вип. 198. С. 22-29.

11. Дорошенко О. Ю. Розробка принципів модифікації базальтового волокна з метою підвищення його ефективності. *Транспортні системи і технології*. 2022. № 40. С. 14-22.

---

Дорошенко Олександра Юріївна, кандидат технічних наук, доцент, кафедра залізничної колії та колійного господарства, Державний університет інфраструктури та технологій. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Тел.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Doroshenko Aleksandra, PhD (Tech). Associate Professor, department of railway track and track economy State University of Infrastructure and Technology. ORCID iD: 0000-0002-6724-0709. Tel.: (067)758-57-33. E-mail: sane4kador@gmail.com.

Статтю прийнято 25.11.2023 р.

УДК 624.21.095: 691.328.5

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО МАТЕРІАЛУ ДЛЯ ПРОКЛАДНОГО ШАРУ БЕЗБАЛАСТНОГО МОСТОВОГО ПОЛОТНА

Д-р техн. наук А. А. Пługін, асист. Н. О. Муригіна, канд. техн. наук А. С. Малішевська,  
д-р техн. наук Д. А. Пługін, асп. М. А. Муригін

## DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A COMPOSITE MATERIAL FOR THE LAYER OF A BALLAST-FREE BRIDGE FLOOR

Dr. Sc. (Tech.) A. A. Plugin, N. O. Murygina, cand. of eng. scien. A. S. Malishevskaya,  
Dr. Sc. (Tech.) D. A. Plugin, postgraduate student M. A. Murygin

*Анотація.* Для сполучення залізобетонних плит безбаластного мостового полотна з металевими балками залізничних мостів традиційно застосовується зручний для укладання і сприятливий за фізико-механічними характеристиками гумодерев'яний прокладний шар, що має недостатню довговічність через гниття деревини. Виконано аналіз напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна, встановлено, що міцність матеріалу прокладного шару між плитами і балками мосту має бути не менше 5 МПа, а модуль деформації не більше 10000 МПа. Експериментально встановлено, що гумодерев'яний прокладний шар зазнає значних деформацій за рахунок гуми і раптово крихко руйнується, а його модуль деформації складає 58,3 МПа для сосни і 144 МПа для дубу. Розроблено та запатентовано конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу, що складається з нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон, цементу, дрібного заповнювача і добавок-прискорювачів твердіння. Досліджено залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару з цього матеріалу від відношення кількості піску до кількості цементу в мінеральній суміші П/Ц, витрат мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ, товщини НМОС. Такий прокладний шар також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається. Встановлено, що модуль деформації та умовна міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням П/Ц і зменшенням М/НМ.

Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу має модуль деформації 144 МПа за П/Ц не більше 0,11 М/НМ 1000 кг/м<sup>3</sup>. Такі склади рекомендовано застосовувати для прокладного шару, спосіб улаштування якого запатентовано.

**Ключові слова:** залізничний металевий міст, безбаластне мостове полотно, залізобетонна плита, прокладний шар, рулонний композиційний матеріал, поліефірне волокно, цемент, модуль деформації.

**Abstract.** To connect the reinforced concrete slabs of the ballastless bridge deck with the metal girders of the railway bridges, a rubber-wood lining layer, which is convenient for laying and has favorable physical and mechanical characteristics, is traditionally applied, which has insufficient durability due to wood rot. An analysis of the stress-strain state of a reinforced concrete slab of a ballastless bridge deck was performed, and it was established that the strength of the material of the lining layer between the slabs and the bridge girders after 6–8 hours after laying should be at least 1 МПа, at the age of 2 days or more – at least 5 МПа, the modulus of deformation should not be more than 10,000 МПа. The value of the modulus of deformation and compressive strength of the rubber-wood lining layer was determined. Such a lining layer undergoes significant deformations due to the rubber and suddenly breaks down. The modulus of deformation is 58.3 МПа for pine and 144 МПа for oak. A structural and technological solution of the laying layer made of rolled composite material, consisting of a non-woven material of a volumetric structure of NWMVS from anisometrically oriented polyester fibers, cement, fine sand aggregate and hardening accelerator additives, was developed and patented. The dependences of the modulus of deformation and compressive strength of the paving layer made of rolled composite material on the ratio of the amount of sand to the amount of cement in the mineral mixture S/C, the consumption of the mineral mixture per unit of volume of NWMVS M/NM, and the thickness of NWMVS were investigated. Such a lining layer also undergoes significant deformations, however, destruction with a violation of structural integrity is not observed. It was established that the modulus of deformation and conditional compressive strength of the composite material decrease with an increase in the content of S/C sand in the mineral mixture and a decrease in the consumption of the mineral mixture per unit area and volume of NWMVS M/NM. The laying layer made of rolled composite material has a modulus of deformation of 144 МПа for S/C no more than 0.11, M/NM 1000 kg/m<sup>3</sup>. Such compositions are recommended to be inserted for the lining layer, the method of which is patented.

**Keywords:** railway metal bridge, безбаластне мостове полотно, reinforced concrete slab, lining layer, rolled composite material, polyester fiber, cement, deformation modulus.

**Вступ.** На залізницях України експлуатується значна кількість залізничних мостів і шляхопроводів: металевих, залізобетонних, кам'яних. Великі мости часто є комбінованими, з металевими великими русловими прогонами та залізобетонними меншої довжини береговими. На залізобетонних, кам'яних, деяких металевих мостах рейкова колія укладена на баласті, засипаному в баластове корито. Така верхня будова колії за конструкцією та деформаційними характеристиками близька до звичайної колії на земляному полотні.

На більшості металевих мостів (рис. 1) улаштовується безбаластне мостове полотно (БМП), раніше – на дерев'яних поперечинах (рис. 1, а), у наш час – на залізобетонних плитах (рис. 2) [1]. Мостове полотно укладається на головні балки балкових прогонових споруд (рис. 1, а) або подовжні балки балкової клітки прогонів з наскрізними фермами (рис. 1, б). Мостове полотно на дерев'яних поперечинах через його низьку довговічність і дефіцит якісної деревини вже понад 30 років у плановому порядку замінюється БМП із залізобетонних плит.

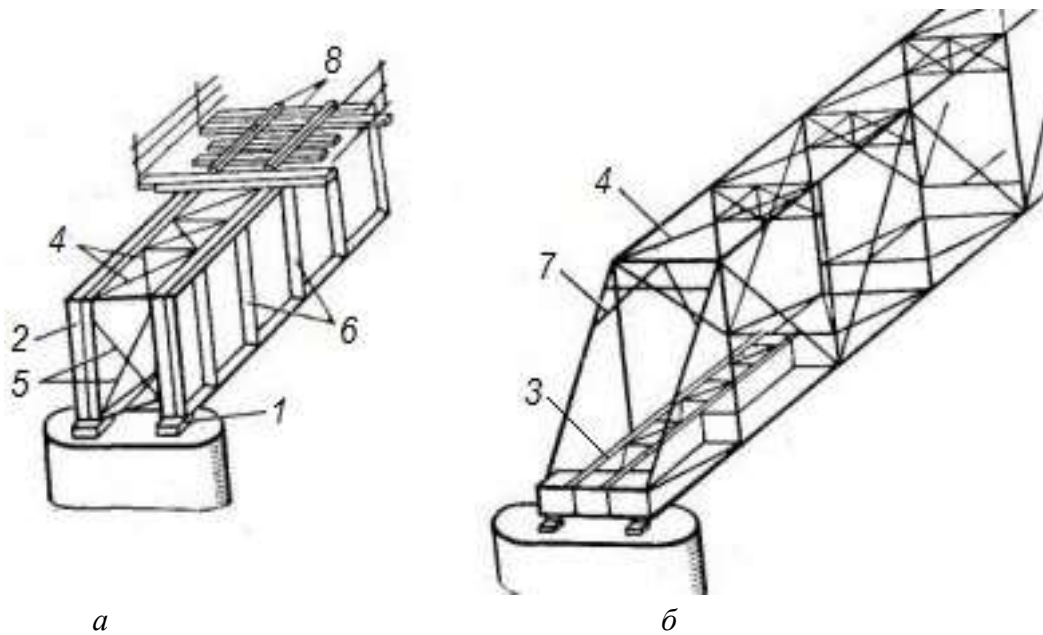


Рис. 1. Схеми конструкції прогонових будов металевих мостів:  
*а* – балкової з їздою поверху; *б* – з наскрізною фермою з їздою понизу;  
 1 – опорні частини; 2 – головна балка; 3 – подовжня балка; 4 – подовжні зв'язки;  
 5 – поперечні зв'язки; 6 – ребра жорсткості; 7 – порталне заповнення;  
 8 – мостове полотно з рейковою колією

Традиційним елементом сполучення плит БМП зі сталевими подовжніми балками мосту є гумодерев'яний прокладний шар (рис. 2, б). Проте він має невисоку довговічність, тому розроблення нових матеріалів для прокладного шару є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Плити БМП (рис. 2, а) [1] виготовляють шириною відносно осі колії 3200 мм, чотирьох основних типорозмірів на 3 і 4 пари підрейкових площадок довжиною відносно осі колії 1390 і 1890 мм для епюри шпал 1840 шт./км і 1490 і 1990 мм – для епюри шпал 2000 шт./км. Кожний із цих типорозмірів має різновиди, призначені для укладання на мости з відстанню між подовжніми балками в осях 1900, 2000, 2100 і 2200 мм.

Плити БМП укладаються на гумодерев'яний прокладний шар завдяки його перевагам – простоті й технологічності. Його невисока

довговічність обумовлена біологічними пошкодженнями деревини, які призводять до втрати нею фізико-механічних властивостей і швидко спричиняють розлади колії [2].

Довговічними є різновиди наливного полімеркомпозиційного прокладного шару [3, 4]. Проте через труднощі улаштування епоксидно-кам'яновугільна композиція не набула розповсюдження [3], а поліуретанова еластична композиція у сполученні з розташуванням рейок у рейкових каналах плит БМП в Україні знайшла застосування лише в трамвайних коліях [4]. Через це можна вважати доцільним розроблення нового довговічного швидкотверднучого композиційного матеріалу і конструктивно-технологічного рішення прокладного шару під БМП із нього, які б поєднували переваги і виключали недоліки гумодерев'яного та полімеркомпозиційного прокладних шарів, і актуальним завданням.

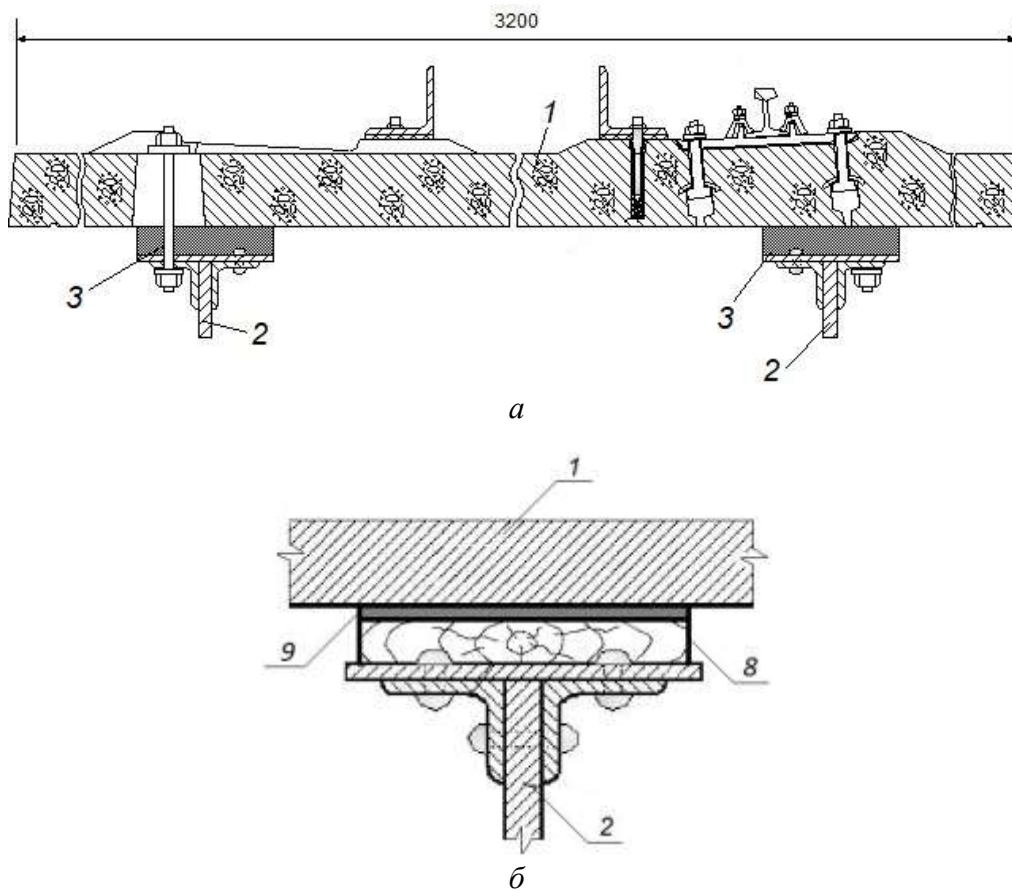


Рис. 2. Безбаластне мостове полотно на залізобетонних плитах:  
*a* – конструкція БМП; *б* – гумодерев'яний прокладний шар;  
1 – плита БМП; 2 – верхня полка подовжньої (головної) балки прогонової будови;  
3 – прокладний шар; 4 – дерев'яна дошка прокладного шару; 5 – гумова частина  
гумодерев'яного прокладного шару; 7 – високоміцна шпилька; 8 – отвір у плиті для  
високоміцної шпильки

Такий матеріал буде особливо корисним у зв'язку з тим, що на сьогодні в Україні через воєнну агресію росії зруйнована велика кількість залізничних мостів, як залізобетонних, так і металевих з наскрізними фермами (рис. 3, а), балкових (рис. 3, б). Металеві прогонові будови в багатьох випадках підлягають ремонту, оскільки, по-перше, менше пошкоджуються навіть під час падіння з опор (рис. 3); по-друге, у них можуть замінюватися та

підсилюватись окремі елементи. Залізобетонні прогонові будови ламаються, їхній бетон подрібнюється, вони не підлягають ремонту, і їх доцільно замінювати на балкові металеві. Отже, на переважній більшості зруйнованих мостів під час їхнього відновлення буде влаштовуватися безбаластне мостове полотно, яке доцільно укласти на прокладний шар із зазначеної композиції.



*а*



*б*

Рис. 3. Зруйновані під час воєнних дій в Україні металеві залізничні мости: *а* – балковий [6]; *б* – з наскрізними фермами [7]

Виконано аналіз переваг і недоліків безбаластних конструкцій мостового полотна на різному прокладному шарі. За роботою [7], умови експлуатації баластної та безбаластної колій на мостах з короткими та довгими прогоновими будовами принципово відрізняються. На мостах з баластною колією довготривалі деформації прогину внаслідок повзучості та усадки бетону залізобетонних прогонових будов або втоми металу металевих прогонових будов можна не враховувати, оскільки виправлення колії у профілі може бути здійснене підбиванням. На мостах з безбаластною колією та короткими прогоновими будовами довготривалі

деформації прогину також можна не враховувати, але для довгих прогонових будов такі деформації та подальші розлади колії від них мають враховуватися.

Автори роботи [8] виконали аналіз напружено-деформованого стану залізобетонного безбаластного мостового полотна в умовах динамічних впливів від високошвидкісного рухомого складу: зроблено висновки про наявність значних відривних зусиль БМП від подовжніх балок і недоцільність застосування прокладного шару за межами мосту, проте пропозицій щодо корегування деформативних властивостей прокладного шару для зниження цих зусиль не надано.

### **Постановка мети та завдання досліджень**

**Мета дослідження** – обґрунтування складу і фізико-механічних властивостей композиційного матеріалу для прокладного шару безбаластного мостового полотна, який матиме більшу довговічність, ніж гумодерев'яний шар.

#### **Завдання досліджень:**

- виконати аналіз напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна та обґрунтувати потрібні фізико-механічні властивості композиційного прокладного шару;

- розробити конструктивно-технологічне рішення і матеріал прокладного шару з композиційного матеріалу;

- визначити величину модуля деформації і міцності на стиск гумодерев'яного прокладного шару;

- дослідити залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару з композиційного матеріалу від показників його складу.

#### **Основний матеріал досліджень**

**Обґрунтування потрібних фізико-механічних властивостей прокладного шару.** У роботах [2, 3, 9] різними розрахунковими засобами виконувався аналіз напружено-деформованого стану безбаластного мостового полотна та прокладного шару під ним під поїзними навантаженнями, передбаченими інструкцією [10]. У роботі [3] розрахунками, виконаними точними методами, встановлено вимоги до необхідної міцності прокладного шару БМП на момент монтажу та експлуатації. За результатами розрахунків встановлено, що міцність на першу добу має бути не менше 1 МПа, другу добу – не менше 5 МПа.

Для обґрунтування фізико-механічних характеристик прокладного шару в роботах [9, 11] виконано розрахункові експерименти і аналіз НДС плити БМП і самого шару. Експерименти проводилися за

методикою [12] методом скінчених елементів у просторовій постановці за допомогою програмного комплексу ЛІРА-САПР. Розрахункову схему склали з 38992 об'ємних фізично нелінійних ізопараметричних скінчених елементів № 234 і 236 з кількістю вузлів 45126. У моделі контакт між прокладним шаром і плитою не розкривається, прокладний шар опирали на абсолютно жорстку основу. Змінними параметрами приймали модуль деформації прокладного шару (3, рис. 2, а) зі значеннями 2000, 10000, 35000 МПа як у полімерних композитів, деревини сосни, бетону класу С32/40 відповідно та силу натягу високоміцних шпильок (рис. 2, а) кріплення плити до подовжньої балки – 49, 98 і 128 кН. Натяг шпильок моделювали навантаженням, прикладеним через пластину-шайбу.

Модель плити БМП завантажували етапами кроками по 20 % на кожному етапі, на першому – власною вагою плит і натягом шпильок, на другому – власною вагою, натягом шпильок і тимчасовим навантаженням 245 кН однієї осі рухомого складу. Розрахунок здійснювали кроково-ітераційним методом. Деякі найбільш наочні поля напружень наведені на рис. 4.

Розтягувальні напруження до 1,81 МПа, що наближаються до границі міцності бетону на розтяг, були виявлені на верхній грані плит саме в місцях, де під час експлуатації часто утворюються тріщини [2] (рис. 4, а). За результатами аналізу напружено-деформованого стану БМП у роботах [9, 11, 13] для зниження напружень у плитах і самому прокладному шарі запропоновано застосовувати жорсткий прокладний шар з модулем деформації понад 10000 МПа, а натяг шпильок здійснювати силою, що не перевищує 98 кН, бо за більших величин натягу напруження у плиті збільшуються та наближаються до величин границі міцності бетону. Проте відомо, що застосування дерев'яного прокладного шару без гуми призводило до збільшення

пошкоджуваності БМП, отже, доцільно переосмислити результати робіт [9, 11, 13], а також дослідити деформативні

характеристики гумодерев'яного прокладного шару.

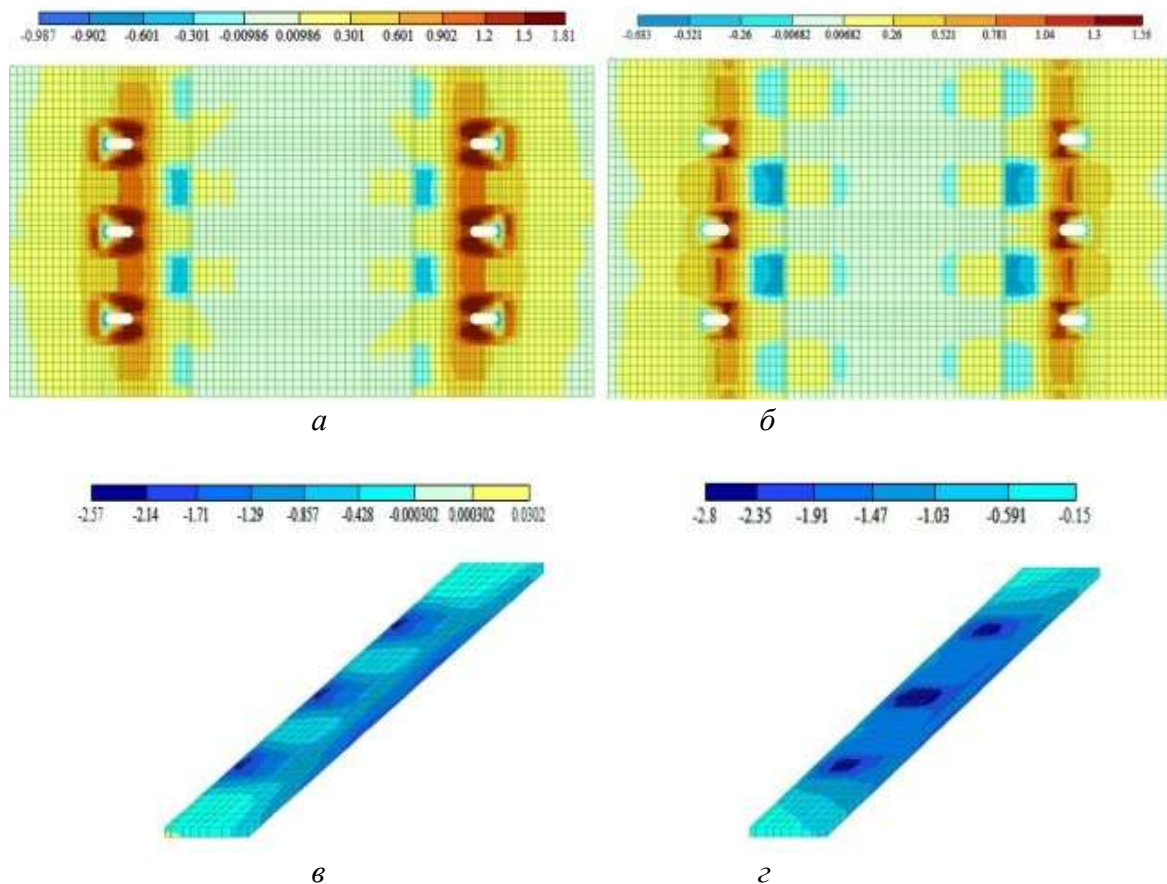


Рис. 4. Ізополя напружень у верхній грані плити БМП (а, б) і прокладному шарі (в, г) для значень модуля деформацій прокладного шару і натягу шпильок відповідно 35000 МПа і 128 кН (а, в); 5000 МПа і 49 кН (б, г)

На рис. 5 наведено отримані за результатами розрахунків оновлені залежності максимальних напружень у плиті БМП (а-в) і прокладному шарі (г) від величини сили затягування високоміцних шпильок за різних величин модуля деформації прокладного шару (а) і модуля деформації прокладного шару за різних значень сили затягування шпильок (б-г).

Із рис. 5 видно, що на величину напружень впливає більшою мірою сила натягу шпильок, меншою – модуль деформації прокладного шару, зі

зниженням їхніх значень напруження також зменшуються.

Отже, міцність матеріалу прокладного шару через 6–8 год твердіння має бути не менше 1 МПа, у віці дві доби та більше – не менше 5 МПа, модуль деформації має бути не більше 10000 МПа, бажано близьким до модуля деформації гумодерев'яного прокладного шару. Аналіз показує, що найбільш придатною для прокладного шару може бути швидкотверднуча дисперсно-армована композиція на основі мінеральної в'язучої речовини [14, 15].



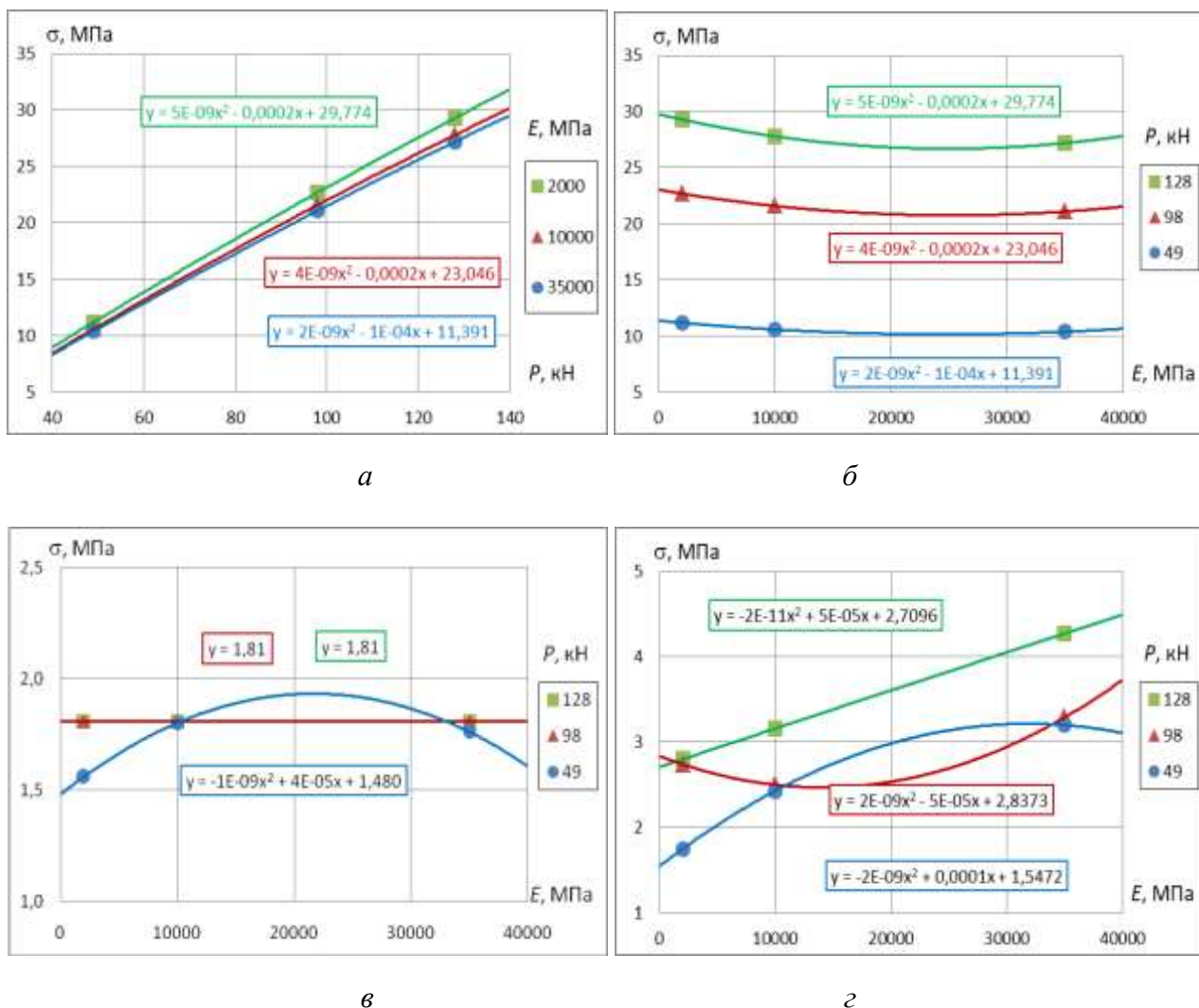


Рис. 5. Залежності максимальної величини напружень  $\sigma$  від модуля деформації прокладного шару  $E$  за різних зусиль натягу шпильок  $P$ :  
 а, б – у плиті БМП стискальних (а) і розтягувальних у верхній грані (б);  
 в – прокладному шарі стискальних

**Аналітичний огляд в'яжучих речовин і композиційних матеріалів, придатних для улаштування прокладного шару під безбаластним мостовим полотном.** Виконано аналіз літературних джерел щодо в'яжучих речовин і композиційних матеріалів, здатних забезпечити визначені властивості прокладного шару під безбаластним мостовим полотном. Для матеріалів на основі портландцементу міцність на стиск 5 МПа є з великим запасом досяжною величиною навіть за природного твердіння.

Проте досягнення міцності на стиск навіть 1 МПа через менш ніж 24 год природного твердіння потребує вживання заходів з прискорення твердіння.

Аналіз літературних джерел показав, що прискорення твердіння досягається введенням хімічних добавок – солей-електролітів, суперпластифікаторів (аніонактивних поверхнево-активних речовин) [16, 17], застосуванням цементів, що містять багатокомпонентні мінеральні добавки [18], уведенням золи нанодисперсної фракції [14]. У разі

застосування добавок суперпластифікаторів прискорення твердіння і набуття більш високих фізико-механічних властивостей обумовлене в основному зниженням водоцементного відношення. У разі введення солей-електролітів прискорення твердіння та підвищення показників фізико-механічних властивостей багато авторів пов'язують зі взаємодією цих солей з алюмінатними фазами портландцементного клінкера з утворенням *AFm* і *Aft*-фаз – гідросульфо-, гідронітро-, гідрокарбо-, гідрохлоралюмінатів кальцію [19–23].

Уведення золи нанодисперсної фракції, на думку авторів роботи [14], прискорює гідратацію цементу за рахунок того, що наночастинки золи відіграють роль центрів кристалізації. Вважаємо це трактування дещо обмеженим, оскільки такі частинки в лужному середовищі швидко розчиняються і взаємодіють з вапном, отже, прискорюють утворення гідросилікатів кальцію та сприяють їхньому більш рівномірному розподілу по структурі продуктів гідратації.

Автори робіт [24, 25] для гідроізоляційних цементних композицій проникної дії пропонують комплекс хімічних добавок – солей-електролітів і суперпластифікатора (аніонактивної поверхнево-активної речовини), який за рахунок утворення *AFm* і *Aft*-фаз не тільки забезпечує водонепроникність конструкцій із бетону, що ізолюються, а й здатний суттєво прискорити твердіння портландцементу і відіграти роль інгібітора корозії сталі. Крім того, у роботах [25, 26] для запобігання утворенню усадкових тріщин пропонується дисперсне армування полімерними волокнами, яке, як ми вважаємо, сприятиме підвищенню також і ранньої міцності.

Проте поєднання хімічних і мінеральних добавок з дисперсним армуванням стосовно прокладного шару БМП необхідно ретельно досліджувати та обґрунтовувати. Так, автори роботи [14] досягли максимального підвищення

статичної міцності цементної композиції добавками керамічного порошку та 0,25 % базальтового волокна. Подальше збільшення вмісту волокна обумовило зниження статичної міцності, але подальше зростання динамічної міцності.

За результатами аналітичного огляду літературних джерел висунуто гіпотезу: отримати прокладний шар БМП, який набуває необхідної міцності за 6–8 год і має довговічність не менше 50 років, з застосуванням композиційного матеріалу з портландцементу з комплексною хімічною добавкою (забезпечує прискорення твердіння та є інгібітором корозії сталі) і полімерних волокон (забезпечують міцність).

**Конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з композита з цементу і полімерних волокон.** Розроблено конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з запропонованого композиційного матеріалу (рис. 6) [27], згідно з яким послідовність його улаштування така: композиційний матеріал попередньо виготовляють у вигляді рулонів із нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС, цементу, дрібного заповнювача – піску і добавок-прискорювачів твердіння (рис. 6, а); на попередньо очищену верхню полицю балок мосту встановлюють локальні опори висотою, що відповідає проектній товщині прокладного шару (рис. 6, б), рулони просочують водою, розкочують, укладають у декілька шарів загальною товщиною на 20–40 % більше за проектну товщину прокладного шару та укладають плити БМП у проектне положення (рис. 7). Ущільнення композита забезпечується вагою плит.

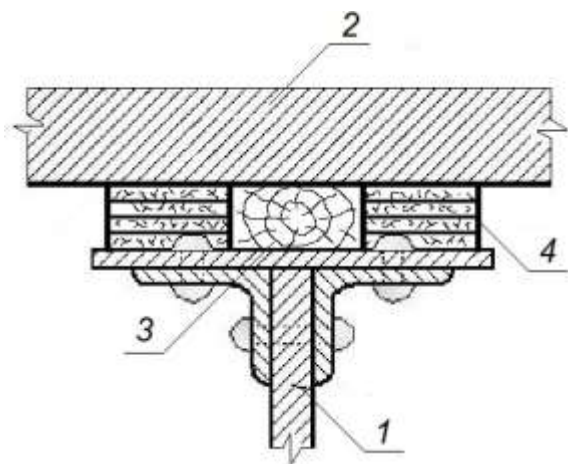
**Експериментальне дослідження та обговорення результату.** Досліджено фізико-механічні властивості гумодерев'яного прокладного шару з сосни та дубу і прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу. Зразки гумодерев'яного прокладного шару складала з дерев'яних кубів з розміром

ребра 50 мм і квадратних пластин розміром 50×50 мм із транспортерної стрічки товщиною 10 мм (рис. 7). Отже, відношення товщини армованої гуми до деревини у прокладному шарі склало 1:5. Зразки стискали на гідравлічному пресі поступово, вимірюючи відстань між

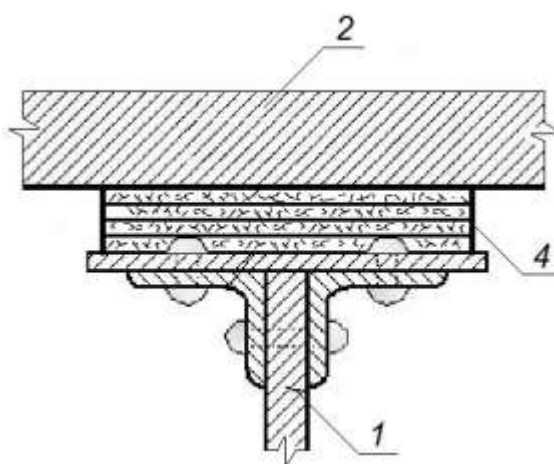
плитами пресу. За результатами вимірювань трьох зразків будували діаграму деформування (графік залежності між напруженням та деформацією), за якою визначали модуль деформації  $E$  і міцність на стиск  $f$  гумодерев'яного прокладного шару.



*a*



*б*



*в*

Рис. 6. Улаштування прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу: *a* – заготівля рулонного композиційного матеріалу; *б, в* – схема улаштування прокладного шару в місці встановлення локальної опори (*a*) і поза місцями встановлення локальних опор (*в*); 1 – подовжня сталеві балка залізничного мосту; 2 – залізобетонна плита безбаластного мостового полотна; 3 – дерев'яна локальна опора; 4 – шари рулонного композиційного матеріалу



Рис. 7. Зразки гумодерев'яного прокладного шару

Для виготовлення зразків прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу застосовано мінеральну суміш і НМОС із анізотрично орієнтованих поліефірних волокон (синтепон) товщиною 10 мм густиною  $100 \text{ г/м}^2$  і 20 мм густиною  $200 \text{ г/м}^2$ . Для мінеральної суміші застосовано портландцемент СЕМ І 42,5 R EN 197-1, пісок ДСТУ Б В.2.7-32-95 Безлюдівського родовища з модулем крупності 1,0-1,1 (дуже дрібний).

Під час експерименту варіювали склад мінеральної суміші та її витрати на одиницю об'єму НМОС. У складі мінеральної суміші масове відношення кількості піску до кількості цементу приймали 0; 1; 1,5; 2. Витрати мінеральної суміші на  $1 \text{ м}^2$  НМОС товщиною 10 мм приймали 3,33; 6,67; 10  $\text{кг/м}^2$ , що відповідає 333; 667; 1000  $\text{кг/м}^3$ , на  $1 \text{ м}^2$  НМОС товщиною 20 мм приймали

3,33; 6,67; 10; 15; 20  $\text{кг/м}^2$ , що відповідає 167; 334; 500; 750; 1000  $\text{кг/м}^3$ .

Компоненти суміші зважували, висипали у змішувач і ретельно перемішували не менше 3 хв. Із НМОС нарізали листи розміром  $200 \times 200 \text{ мм}$ . Форму-рамку для приготування НМОС розміром  $200 \times 200 \text{ мм}$  (рис. 8) встановлювали на вібромайданчик і викладали поліетиленовою плівкою так, щоб краї плівки висувалися вище бортів форми (рис. 8, а). На дно форми укладали лист НМОС, вмикали вібромайданчик і повільно та рівномірно насипали зверху попередньо зважену суху суміш (рис. 8, б). Вібрування продовжували, розрівнюючи суміш пензлем, до видимого припинення проникнення суміші вглиб НМОС. Плівку брали за краї, видаляли композицію з форми та загортали у плівку (рис. 8, а, 8, в).

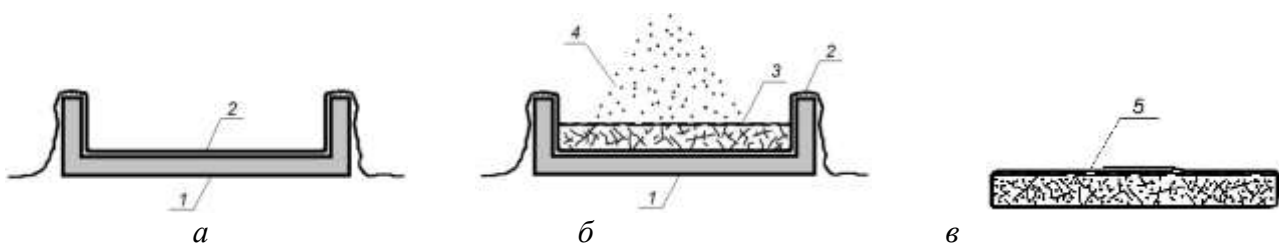


Рис. 8. Виготовлення зразків композиції для експериментальних досліджень:

*а* – вкладання у форму поліетиленової плівки; *б* – вкладання у форму листа НМОС і засипання мінеральною сумішшю; *в* – видалення композиції з форми і загортання у плівку; *1* – форма; *2* – поліетиленова плівка; *3* – НМОС; *4* – суха суміш; *5* – готовий зразок

Виготовлення зразків прокладного шару здійснювали у такий спосіб. У плівці, у яку загорнуто лист композиції розміром 200×200 мм, шилом проколювали отвори в шахматному порядку на відстані 30 мм один від одного. Лист композиції, загорнутий у плівку з отворами, занурювали у воду на 3 хв, після чого разом із плівкою нарізали на клаптики розміром 50×50 мм. З клаптиків видаляли плівку, пошарово укладали їх у матрицю прес-форми (рис. 9, а, б). Кількість шарів приймали такою, яка забезпечувала заповнення матриці доверху. Зразок притискали пуансоном, на який встановлювали штучний вантаж (рис. 9, в). Сумарну масу пуансона і штучного вантажу приймали відповідною технологічному тиску на прокладний шар під час укладання БМП:

$$p = m/(nlb) = 2500/(2 \cdot 189 \cdot 20) = 0,33 \text{ кг/см}^2, \quad (1)$$

де  $m$  – маса плити БМП, 2500 кг;  
 $n$  – кількість подовжніх балок, 2;  
 $l$  – довжина плити, 189 см;  
 $b$  – ширина прокладного шару (балки), 20 см.

Отже, сумарна маса пуансона і штучного вантажу складала  $5 \cdot 0,33 = 8,25$  кг, час витримки під тиском – 3 хв. Після витримання зразка під тиском матрицю перегортали і витискали зразок за допомогою виштовхувального кільця (3, рис. 9, а). За допомогою електронного штангенциркуля вимірювали висоту зразка  $h$  і визначали ступінь його стиснення:

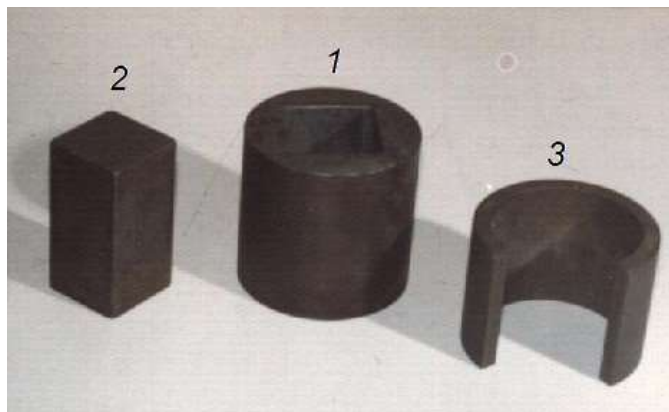
$$K_{ст} = h/h_0, \quad (2)$$

де  $h_0$  – первинна висота зразка (матриці).

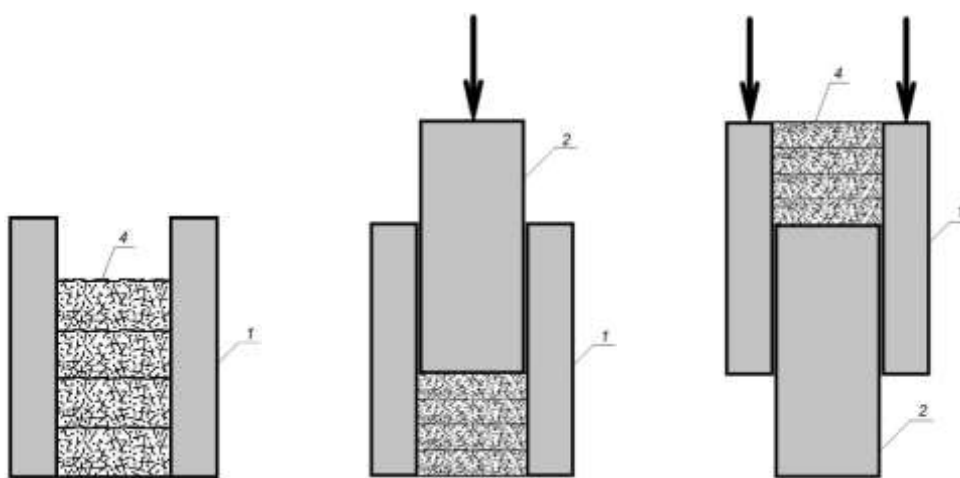
Кожного складу композиції виготовляли по дев'ять зразків. Відформовані зразки накривали поліетиленовою плівкою і витримували за температури  $20 \pm 3$  °С. Через 6 і 24 год, а також 28 діб твердіння випробували по три зразки з визначенням маси, розмірів, середньої густини  $\rho$ , початкового модуля пружності (модуля деформації)  $E$  та міцності на стиск  $f$ . Для визначення  $E$  та  $f$  зразки стискали на гідравлічному пресі ступінчасто, вимірюючи відстань між плитами пресу, за результатами вимірювань трьох зразків будували діаграму деформування (графік залежності між напруженням і деформацією), за якою і визначали  $E = \sigma/\varepsilon$  на початковій ділянці кривої деформування та  $f$  прокладного шару як напруження  $\sigma$  у місці перелому кривої. У віці 28 діб визначали також водопоглинання за масою  $W_m$ .

Діаграми деформування гумодерев'яного прокладного шару та прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу, виготовленого з НМОС різної товщини  $\delta$ , з різним вмістом крупного заповнювача П/Ц і різними витратами мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ наведено на рис. 10. Діаграми залежностей початкового модуля пружності  $E$  та міцності на стиск  $f$  прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 і 20 мм від масового відношення кількості піску до цементу П/Ц і витрат мінеральної суміші на  $1 \text{ м}^3$  НМОС наведено на рис. 11.

Із рис. 11, а видно, що гумодерев'яний прокладний шар за рахунок деформації гуми зазнає значних деформацій і раптово крихко руйнується. Модуль його деформації та міцність на стиск складає для деревин сосни  $E = 58,3$  МПа і  $f = 5,5$  МПа, деревини дубу –  $E = 144,3$  МПа і  $f = 7,9$  МПа (таблиця).



*a*



*б*

*в*

*г*



*д*

Рис. 9. Формування зразків прокладного шару для випробувань:  
*a* – прес-форма; *б* – пошарове укладання композита в матрицю прес-форми;  
*в* – ущільнення зразка пуансоном; *г* – витиснення зразка з матриці пуансоном за допомогою виштовхного кільця; *д* – затверділі зразки;  
*1* – матриця; *2* – пуансон; *3* – виштовхне кільце; *4* – зразок

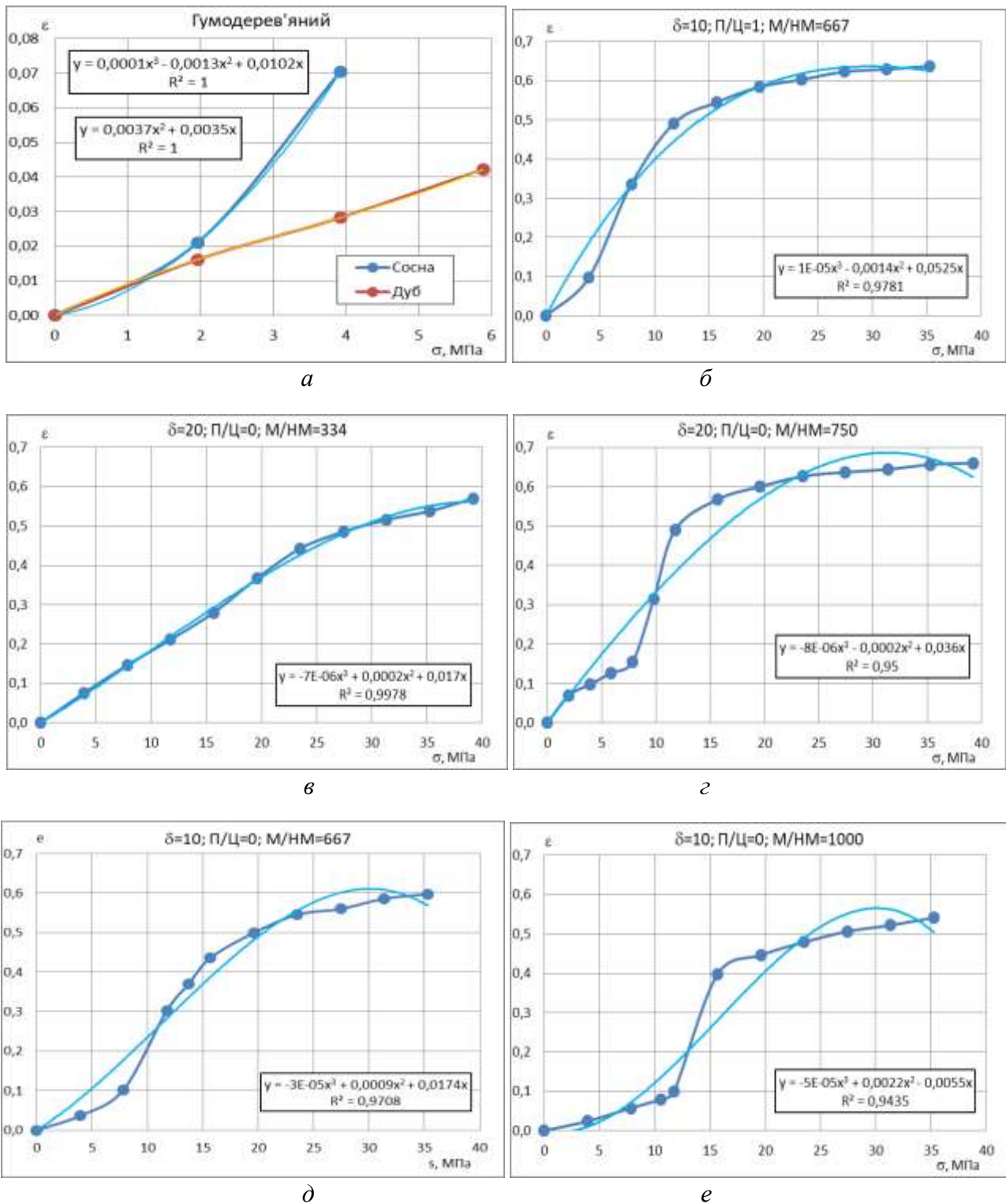


Рис. 10. Діаграми деформування (залежності відносної деформації  $\epsilon$  від стискального напруження  $\sigma$ ) захисного шару: *а* – гумодерев'яного з відношенням товщини армованої гуми до товщини деревини 1:5 із сосни та дуба; *б–е* – із рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною  $\delta$  20 мм (*в, г*) і 10 мм (*б, д, е*) з різним масовим відношенням кількості піску до кількості цементу П/Ц і витратами мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ

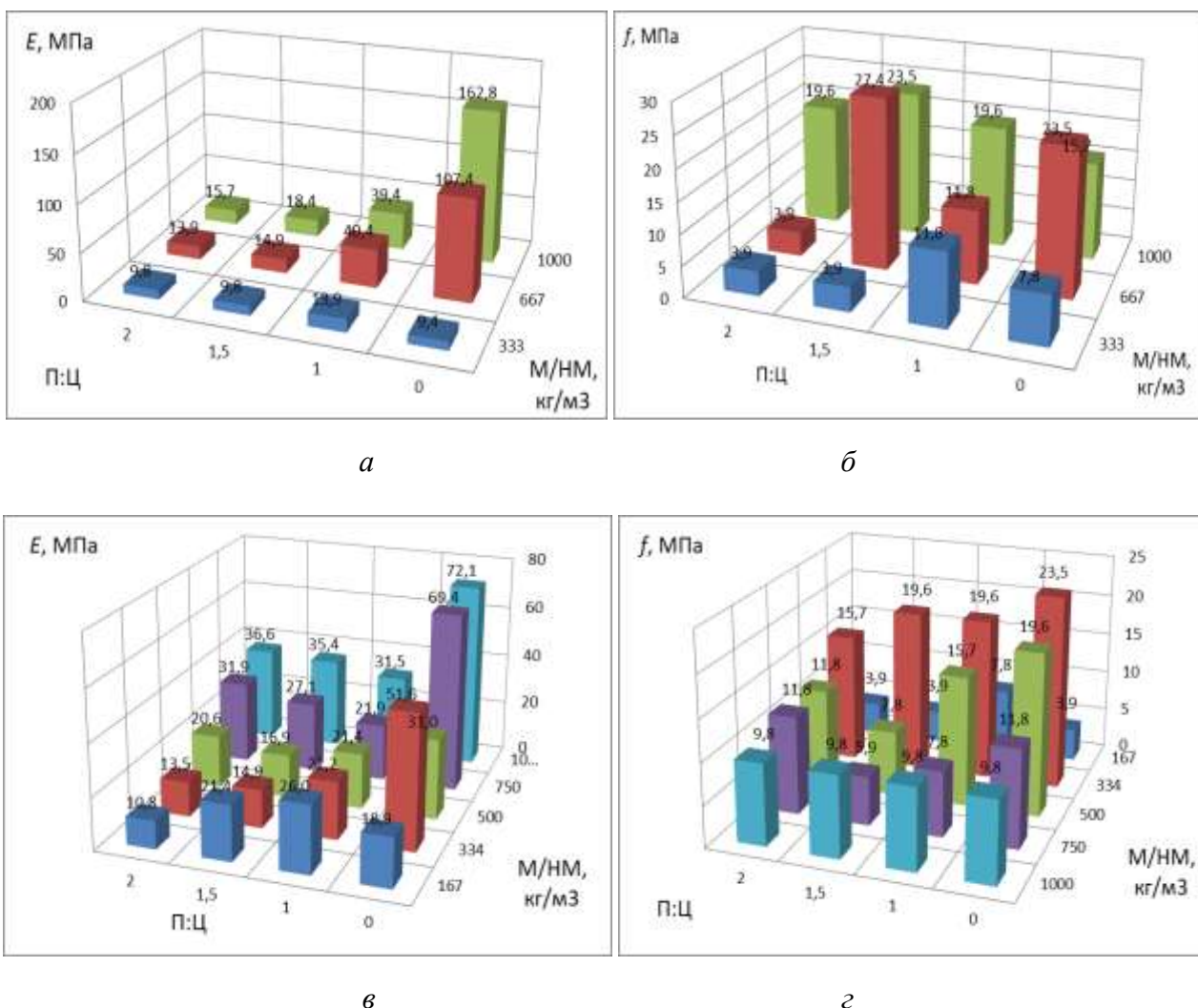


Рис. 11. Залежності початкового модуля пружності  $E$  (а, в) і міцності на стиск  $f$  (б, г) прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 мм (а, б) і 20 мм (в, г) від масового відношення кількості піску до цементу П/Ц і витрат мінеральної суміші на 1 м<sup>3</sup> НМОС

Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається. Модуль його деформації (початковий модуль пружності) визначали за діаграмами руйнування як тангенс їхнього кута нахилу на ділянці, що відповідає фактичним напруженням у прокладному шарі до 3 МПа (рис. 4, в, г). У зв'язку з відсутністю видимого руйнування

міцність на стиск приймали умовно за місцем найбільшої кривизни діаграм рис. 10, б–г.

Із рис. 11 видно, що модуль деформації та міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі збільшенням вмісту в мінеральній суміші піску П/Ц і зменшенням витрат мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму НМОС М/НМ.



Порівняльні фізико-механічні характеристики гумодерев'яного і композиційного прокладного шарів різного складу

Прокладний шар			Початковий модуль пружності $E$ , МПа	Міцність на стиск $f$ , МПа
Гумодерев'яний гума/деревина 1:5	Сосна		58,3	5,5
	Дуб		144,3	7,9
Із рулонного композиційного матеріалу	$\delta$ , мм	П/Ц	М/НМ, кг/м <sup>3</sup>	
	10	1	667	40,4
	20	0	334	51,6
	20	0	750	69,4
	10	0	667	107,4
	10	0	1000	162,8
	10	0,31	667	58,3
	10	0,79	1000	58,3
10	0,11	1000	144,3	не менше 11,8

У таблиці наведено значення модуля деформації  $E$  і міцності на стиск  $f$  гумодерев'яного прокладного шару з сосни та дубу та прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу складів з близькими до них значеннями  $E$  та  $f$  (із НМОС товщиною 10 і 20 мм, витратами мінеральної суміші М/НМ 666 і 1000 кг/м<sup>3</sup>, відношенням П/Ц 0 та 1). Для уточнення складів, що забезпечать деформативні характеристики, аналогічні гумодерев'яному прокладному шару, здійснено апроксимацію залежностей  $E$  від П/Ц (рис. 12). Ці залежності добре апроксимуються з коефіцієнтами кореляції 0,99 квадратним рівняннями для М/НМ 667 і 1000 кг/м<sup>3</sup> відповідно:

$$y = 22,86x^2 - 93,52x + 107,9; \quad (3)$$

$$y = 48,64x^2 - 170,3x + 162,5, \quad (4)$$

де  $y = E$ ,  $x = \text{П/Ц}$ .

Із рис. 12 видно, що залежність (3) може забезпечити модуль деформації прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу лише такий, як у

гумодерев'яного прокладного шару з сосни  $E = 58,3$  МПа. Підставивши це значення в рівняння (3), отримаємо

$$22,86x^2 - 93,52x + 49,6 = 0. \quad (5)$$

У результаті розв'язання цього рівняння отримаємо значення  $x = \text{П/Ц} = 0,31$ , яке забезпечить модуль деформації прокладного шару  $E = 58,3$  МПа.

Залежність (4) може забезпечити модуль деформації прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу як і гумодерев'яного прокладного шару як із сосни  $E = 58,3$  МПа, так і дуба  $E = 144,3$  МПа. Підставивши ці значення в рівняння (4), отримаємо

$$48,64x^2 - 170,3x + 104,2 = 0, \quad (6)$$

$$48,64x^2 - 170,3x + 18,2 = 0. \quad (7)$$

У результаті розв'язання цих рівнянь отримаємо значення  $x = \text{П/Ц} = 0,79$  і  $0,11$ , які забезпечать модуль деформації прокладного шару  $E = 58,3$  і  $144,3$  МПа відповідно.

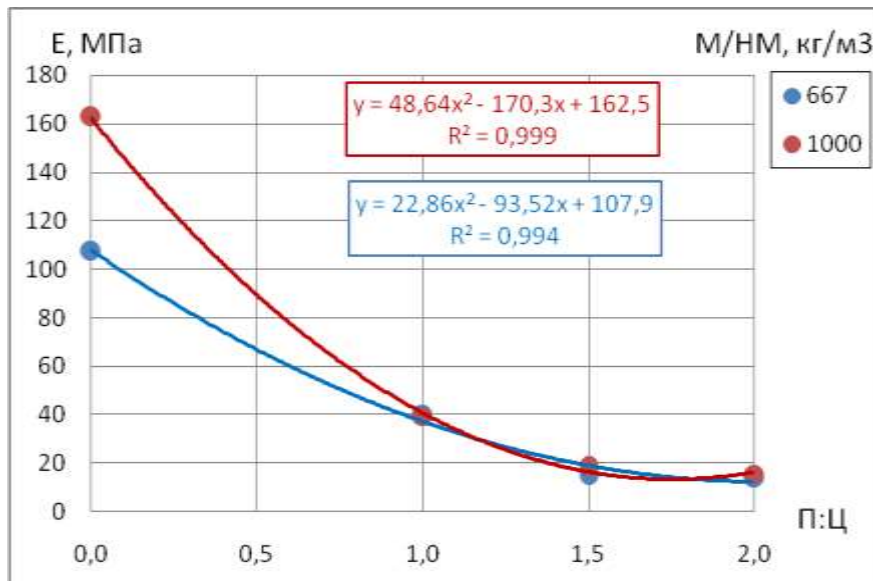


Рис. 12. Залежність початкового модуля пружності  $E$  прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу на основі портландцементу і нетканого матеріалу об'ємної структури товщиною 10 мм від масового відношення кількості піску до цементу П:Ц за різних витрат мінеральної суміші на  $1 \text{ м}^3$  НМОС

Уточнені в такий спосіб склади рулонного композиційного матеріалу для прокладного шару наведені в таблиці. Такі склади рекомендовано застосовувати для прокладного шару, який улаштовується згідно з роботою [27].

**Висновки.** У результаті аналізу напружено-деформованого стану залізобетонної плити безбаластного мостового полотна та з урахуванням технології укладання полотна встановлено, що міцність матеріалу прокладного шару між плитами і балками мосту через 6-8 год після укладання має бути не менше 1 МПа, у віці другої доби та більше – не менше 5 МПа, модуль деформації має бути не більше 10000 МПа. Цим умовам відповідають швидкотверднучі дисперсно-армовані композиції на основі мінеральних в'язучих речовини.

Розроблено та запатентовано конструктивно-технологічне рішення прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу, що складається з нетканого матеріалу об'ємної структури НМОС із анізотрично орієнтованих

поліефірних волокон, цементу, дрібного заповнювача піску і добавок-прискорювачів твердіння.

Визначено величину модуля деформації і міцності на стиск гумодерев'яного прокладного шару. Такий прокладний шар зазнає значних деформацій за рахунок гуми і раптово крихко руйнується. Модуль деформації складає 58,3 МПа для сосни і 144 МПа для дуба.

Досліджено залежності модуля деформації та міцності на стиск прокладного шару з рулонного композиційного матеріалу від відношення кількості піску до кількості цементу в мінеральній суміші П:Ц, витрат мінеральної суміші на одиницю об'єму НМОС М/НМ, товщини НМОС. Такий прокладний шар також зазнає значних деформацій, проте руйнування з порушенням структурної цілісності не спостерігається.

Встановлено, що модуль деформації та умовна міцність на стиск композиційного матеріалу зменшуються зі

збільшенням вмісту в мінеральній суміші піску П/Ц і зменшенням витрат мінеральної суміші на одиницю площі та об'єму НМОС М/НМ. Прокладний шар із рулонного композиційного матеріалу має модуль

деформації 144 МПа за П/Ц не більше 0,11, М/НМ 1000 кг/м<sup>3</sup>. Такі склади рекомендовано застосовувати для прокладного шару, спосіб улаштування якого запатентовано.

### Список використаних джерел

1. ЦП-0137. Інструкція з укладання та експлуатації безбаластного мостового полотна (БМП) на залізобетонних плитах. Київ: Укрзалізниця, 2006. 100 с.
2. Забіяка О. А. Механізм тріщиноутворення у плитах безбаластного полотна та опорах залізничних мостів і підвищення їх тріщиностійкості: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2015. 217 с.
3. Зверєва А. С. Полімермінеральні композити з регульованими деформативними властивостями для основ залізобетонних транспортних споруд: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Харків, 2021. 246 с.
4. Досвід застосування нових конструкцій безбаластного залізничного полотна у Польщі та оцінка перспектив їх застосування в Україні / Т. Шуба, В. Чистяк, В. Перестюк та ін. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2011. Вип. 122. С. 201-221.
5. Дорослий погляд на світ. URL: <https://i.lb.ua/027/55/54992e30a8e95.jpeg> (дата звернення: 10.11.2023).
6. Весь діловий та активний Малин. URL: <https://malyn.media/wp-content/uploads/2022/04/zaliznychnyy-mist-cherez-Irpin-2.jpg> (дата звернення: 10.11.2023).
7. Ballastless track on bridges /ed. By S. Freudenstein, K. Geisler, T. Molter, M. Missler, Ch. Stolz. Munich. *Ballastless Tracks*. 2017. P. 45-72. DOI:10.1002/9783433606889.ch4.
8. Поляков В. Ю., Данг Н. Т. Безбаластное мостовое полотно на ВСМ. *Мир транспорта*. 2018. Вып. 16 (2). С. 36–55.
9. Аналіз напружено-деформованого стану плит безбаластного мостового полотна і прокладного шару під ними / А. А. Пługін, С. В. Мірошніченко, О. В. Лобяк та ін. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014. Вип. 148 (2). С. 104-110.
10. ЦП-0093. Інструкція з визначення умов пропуску рухомого складу по металевих та залізобетонних залізничних мостах. Київ: Укрзалізниця, 2002. 301 с.
11. Plugin A., Murygina N., Miroshnichenko S., Kaliuzhna O. Materials for Connecting Railway Reinforced Concrete Bridge Deck with Steel Bridge Structures. *International Scientific Conference EcoComfort and Current Issues of Civil Engineering*. Cham: Springer International Publishing. 2022. P. 318-328. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6\\_32](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14141-6_32).
12. Городецький А. С., Євзеров І. Д. Комп'ютерні моделі конструкцій. Київ: Факт, 2007. 394 с.
13. Грибко О. В. Капітальний ремонт мосту на основі нового конструктивно-технологічного рішення прокладного шару залізобетонного безбаластного мостового полотна мостів на ВШМ. Пояснювальна записка і розрахунки до дипломного проекту зі спеціальності 273 «Залізничний транспорт». Харків: УкрДУЗТ, 2022. 67 с.
14. Fediuk R., Smoliakov A., Muraviov A. Mechanical Properties of Fiber-Reinforced Concrete Using Composite Binders. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2017. Article ID 2316347. URL: <https://www.hindawi.com/journals/amse/2017/2316347/>.
15. Reiterman P., Holcapek O., Jogl M., Konvalinka P. Physical and Mechanical Properties of Composites Made with Aluminous Cement and Basalt Fibers Developed for High Temperature

- Application. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2015. Vol. 4. P. 1-10. DOI: 10.1155/2015/703029.
16. Taylor H. F. Cement chemistry. London: Academic Press, 1990. 459 p.
17. Kurdowski W. Cement and Concrete Chemistry. Springer, 2014. 700 p. DOI: 10.1007/978-94-007-7945-7.
18. Marushchak U., Sanytsky M., Sydor N. Design of rapid hardening engineered cementitious composites for sustainable construction, SSP. *Journal of Civil Engineering*. 2017. Vol. 12(2). P. 107-112. DOI: 10.1515/sspjce-2017-0026.
19. Pöllmann H. Syntheses, properties and solid solution of ternary lamellar calcium aluminate hydroxi salts (AFm-phases) containing  $SO_4^{2-}$ ,  $CO_3^{2-}$  and OH<sup>-</sup>. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*. 2006. Vol. 182(2). P. 173-181.
20. Matschei T., Lothenbach B., Glasser F. P. The AFm phase in Portland cement. *Cement and concrete research*. 2007. Vol. 37(2). P. 118-130.
21. Balonis M., Lothenbach B., Le Saout G., Glasser F.P. Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems. *Cement and Concrete Research*. 2010. Vol. 40.7. P. 1009-1022.
22. Balonis M., Medala M., Glasser F.P. Influence of calcium nitrate and nitrite on the constitution of the AFm and AFt cement hydrates - experiments and thermodynamic modelling. *Advances in Cement research*. 2011. Vol. 23(3). P. 129-143.
23. Plugin A. A., Runova R. F. Bonding Calcium Chloride and Calcium Nitrate into Stable Hydration Portland Cement Products: Stability Conditions of Calcium Hydrochloraluminum and Calcium Hydronitroaluminates. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2018. Vol. 36. P. 69-73. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.36.69.
24. Evaluation of the corrosion resistance of the armature under the protective layer «Viatron» / E. V. Kondrashchenko, V. I. Babushkin, T. A. Kostyuk, V. A. Bobko, O. Yu. Proshchin. *Visnik NTU «KhPI»*. 2004. Vol. 41. P. 20-22.
25. Гідроізоляційні цементні композити проникної дії / А. А. Плуґін, Т. О. Костюк, О. Ю. Прошчин та ін. Харків: Ко легіум, 2018. 268 с.
26. Interaction of Mineral and Polymer Fibers with Cement Stone and their Effect on the Physical-Mechanical Properties of Cement Composites / A. A. Plugin, T. O. Kostiuk, O. A. Plugin, D. O. Bondarenko, Yu. A. Sukhanova, N. N. Partala. *International Journal of Engineering Research in Africa*. 2017. Vol. 31. P. 59-68. DOI:10.4028/www.scientific.net/JERA.31.59.
27. Спосіб улаштування прокладного шару між сталевими балками залізничного мосту і залізобетонними плитами безбаластного мостового полотна МПК E04B (2006.01): пат. 153601 Україна: 5/10. № u 2022 04806. Заявл. 19.12.2022; опубл.26.07.2023, Бюл. № 30. 1 с.

---

Плуґін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38 (057) 730-10-58. E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Муригіна Надія Олександрівна, асистент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua.

Малішевська Аліна Сергіївна, кандидат технічних наук, асистент кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4780-7691. E-mail: kttolik@gmail.com.

Плуґін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@gmail.com.

Муригін Максим Андрійович, аспірант кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

---

Plugin Andrii, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38 (057) 730-10-58.

E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Murygina Nadia, assistant of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0001-8843-285X. E-mail: murygina@kart.edu.ua.

Malishevskaya Alina, candidate of engineering sciences, assistant of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4780-7691.

E-mail: kttolik@gmail.com.

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), professor, head of department of building materials and structures department, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63.

E-mail: plugin.da@gmail.com.

Murygin Maksym, postgraduate student of department of Railway Track and Transport Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0009-0004-0532-4765. E-mail: maks.murygin.1999@gmail.com.

Статтю прийнято 9.12.2023 р.

УДК 691.3

## МЕХАНІЗМ СТВОРЕННЯ ЦЕМЕНТНОГО КОМПОЗИТА З ПІДВИЩЕНИМИ ГІДРОФІЗИЧНИМИ І РАДІАЦІЙНО-ЗАХИСНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

Доктори техн. наук Т. О. Костюк, А. А. Плугін, Д. А. Плугін,  
канд. техн. наук О. І. Бондаренко, старш. викл. О. Б. Деденцова

## MECHANISM FOR CREATING A CEMENT COMPOSITE WITH ENHANCED HYDROPHYSICAL AND RADIATION PROTECTION PROPERTIES

Dr. Sc. (Tech.) T. Kostyuk, Dr. Sc. (Tech.) A. Plugin, Dr. Sc. (Tech.) D. Plugin,  
PhD (Tech) O. Bondarenko, senior lecturer O. Dedenova

*Анотація.* Розроблено цементний композит із підвищеними гідрофізичними та радіаційно-захисними властивостями, для забезпечення яких було, по-перше, модифіковано цемент в'язуче хімічними добавками, що сприяли синтезу кристалогідратів із великим вмістом води; по-друге, до складу додано полідисперсні системи у вигляді залізистих кварцитів, у яких мікронні частинки заліза вкраплені у кварцити, що сприяло рівномірному розподілу мікронних частинок заліза в об'ємі композита.

Фізико-хімічні дослідження продуктів гідратації цементного каменю проводили методами рентгеноструктурного, диференційно-термічного та електронно-мікроскопічного аналізів.

Розроблений склад дрібнозернистого бетону має високі експлуатаційні, гідрофізичні властивості, забезпечує захисні властивості від радіаційного випромінювання за рахунок компонентів, які містять важкі та легкі атоми, що дає змогу застосовувати цей матеріал для захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд.

**Ключові слова:** модифікація цементу, синтез, кристалогідрати, важкі елементи, радіаційне випромінювання, легкі атоми.

**Abstract.** In modern conditions, the environmental component of building protective materials is guaranteed by the creation of composites capable of protecting underground and above-ground

parts of buildings and structures in flooded areas from the filtration of radiation-contaminated water, industrial wastewater, radon, etc. Therefore, the problem of developing modern, including radiation-protective materials for the construction industry is urgent. Concrete is a good moderator and absorber of fast neutrons and intensively absorbs gamma radiation. Concrete consists of cement, sand and gravel. Cement consists mainly of oxides of various elements (Ca, Si, Al, Fe) and contains light elements. Portland cements, slag Portland cements and alumina cements are used as binders for the preparation of particularly heavy protective concrete. In special concretes, the most effective binder can be a substance that, as a result of hardening, adds a large amount of water (to increase the hydrogen content of the concrete). Such a substance is calcium hydrosulfoaluminate. Recent studies have shown that very effective radiation protection materials are materials in the form of polydisperse systems containing ultrafine particles (UFP) less than 1 micron in size. However, the difficulty is to distribute the ultrafine particles evenly throughout the material volume, which dramatically reduces its protective functions.

The work resulted in the development of a cement composite with enhanced hydrophysical and radiation protection properties, which were achieved by, firstly, modifying the cement binder with chemical additives that facilitated the synthesis of crystalline hydrates with a high water content. Secondly, polydisperse systems in the form of ferruginous quartzite were added to the composition, where micron-sized iron particles were embedded in quartzite, which contributed to the uniform distribution of micron-sized iron particles in the volume of the composite.

Physicochemical studies of cement stone hydration products were carried out by X-ray diffraction, differential thermal and electron microscopic analyses.

The developed composition of fine-grained concrete has high performance and hydrophysical properties, provides protective properties against radiation due to components containing heavy and light atoms, which may allow the use of this material to protect building structures, buildings and structures.

**Keywords:** cement modification, synthesis, crystal hydrates, heavy elements, radiation, light atoms.

**Постановка проблеми.** Існують водонепроникні високоміцні композиційні матеріали на основі портландцементу. Однак такі матеріали, маючи підвищені гідроізоляційні та фізико-механічні характеристики, повинні мати достатньо товстий шар для забезпечення захисту від радіаційного випромінювання.

У сучасних умовах екологічна компонента подібних матеріалів гарантується створенням композитів, здатних захищати підземні та наземні частини будівель і споруд на обводнених територіях від фільтрації радіаційно-забрудненої води, промислових стоків, радону тощо. Тому проблема розроблення сучасних, у тому числі і радіаційно-захисних, матеріалів для будівельної галузі є актуальною.

Радіаційне випромінювання є потоком альфа, бета і гамма частинок і нейтронів. Гамма-випромінювання має порівняно невелику іонізуючу активність, але через дуже високу проникну здатність становить велику небезпеку для людини.

Послаблюючу дію проникної радіації прийнято характеризувати шаром половинного ослаблення, тобто товщиною матеріалу, проходячи через який ПР зменшується вдвічі. Так, ПР послаблюють вдвічі такі матеріали: свинець завтовшки 1,8 см, цегла – 14 см, сталь – 2,8 см, вода – 23 см, бетон – 10 см, дерево – 30 см.

При створенні сучасних радіозахисних матеріалів визначальними факторами є їхні захисні та механічні властивості, а також вартість і матеріалоемність.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Для захисту від гамма-випромінювання найбільш поширеними матеріалами є свинець, залізо, бетон, залізобетон, вода, свинцеве скло, рідше застосовується збіднений уран, вісмут, тантал та інші важкі речовини.

Для уповільнення швидких нейтронів до теплових застосовуються речовини з малою атомною масою. Найбільш ефективними матеріалами є водневмісні речовини: вода, важка вода, бетон, парафін, поліетилен, різні пластмаси. Після того як швидкі нейтрони сповільнилися, вони можуть бути поглинені. З цією метою застосовують матеріали з великим перерізом поглинання  $\sigma_a$  – бор і матеріали з добавками бору: борні сталі, бораль, графіт борний, карбід бору, борована вода і бетон.

Поглинання нейтронів може супроводжуватися захватним гамма-випромінюванням, тому при виборі матеріалу для поглинання теплових нейтронів треба віддавати перевагу таким, що дають найменше випромінювання. Вода – найпоширеніший і допустимий матеріал, який використовується для уповільнення швидких нейтронів і як захисний матеріал. На атомах водню нейтрони ефективно сповільнюються і перетворюються на теплові. При поглинанні теплових нейтронів у воді виникає захватне гамма-випромінювання з енергією 2,23 МеВ. Застосування борованої води різко знижує захватне гамма-випромінювання. У борованій воді атоми бору легко поглинають теплові нейтрони, а захватне гамма-випромінювання має меншу енергію ( $E_\gamma = 0,5$  МеВ).

Бетон є хорошим сповільнювачем і поглиначем швидких нейтронів, інтенсивно поглинає гамма-випромінювання [1]. До складу бетону входять цемент, пісок і гравій. Цемент складається переважно з оксидів різних елементів (Ca, Si, Al, Fe), містить легкі елементи. Як заповнювачі для такого бетону застосовують матеріали з високою щільністю – барит, магнетит,

лимоніт, а також металевий скрап у вигляді чавунного дроби, обрізків арматурного смугового та профільного металу, металевої стружки тощо [2]. Щільність захисних особливо важких бетонів залежить від виду заповнювача та його густини. Як в'язучі для приготування особливо важких захисних бетонів застосовують портландцементи, шлакопортландцементи і глиноземисті цементи. У спеціальних бетонах найбільш ефективним в'язучим може бути речовина, яка в результаті твердіння приєднує велику кількість води (з метою збільшення вмісту водню в бетоні). Такою речовиною є гідросульфоалюмінат кальцію, який утворюється при взаємодії трикальцієвого алюмінату, що міститься в портландцементі, з гіпсом. Тому один із видів цементу спеціального призначення містить підвищену кількість трикальцієвого алюмінату і гіпсу.

Для поліпшення захисних властивостей гідратних бетонів до їхнього складу вводять добавки, що підвищують вміст у бетоні водню, карбиду, бору, хлористого літію, сірчанокислого кадмію, та інші добавки, що містять легкі елементи – водень, літій, кадмій і боровмісні речовини [3–5].

У роботі [6] для захисту від іонізуючих випромінювань пропонується застосовувати бетон з добавкою графіту, роботі [7] в електропровідних композитах проникної дії на основі портландцементу – сполучати графіт з добавками, що забезпечують утворення високогідратних солей Фриделя, а роботі [8] – сполучати графіт з натрієвим рідким склом.

Конкурентні переваги РЗ бетонів: екологічна безпека; надійність ізоляції поверхонь складної конфігурації; можливість регулювання товщини захисного покриття шляхом пошарового накладання матеріалу; можливість виготовлення деталей необхідного розміру за товщиною, шириною та довжиною. Радіаційно-захисні бетони рекомендується

використовувати при створенні радіаційно-захисних екранів у регіонах радіаційного забруднення, при спорудженні місць збереження радіоактивних відходів, будівництві об'єктів, що знижують радіаційний фон, підвищенні захисних властивостей і гідроізоляції об'єктів укриття від іонізуючого випромінювання.

Нейтронне та  $\gamma$ -випромінювання мають найбільшу проникну здатність серед усіх видів іонізуючих випромінювань і становлять основну небезпеку для персоналу та обладнання. Тому захисні матеріали та споруди проектується зазвичай виходячи з вимог заданого ослаблення саме цих випромінювань. Захисні властивості матеріалу відносно  $\gamma$  нейтронного випромінювання в основному визначаються елементним складом [1]. Носіями функціональних властивостей радіаційно-захисного матеріалу є: відносно  $\gamma$ -випромінювання – елементи з атомними номерами не менше 47 (як правило, залізо або свинець), відносно потоку теплових нейтронів – ряд елементів з атомними номерами 10...20, відносно потоку швидких нейтронів – легкі елементи (водень, літій, вуглець).

При ядерному розпаді найбільшу небезпеку для живих організмів становлять  $\gamma$ -промені та нейтронне випромінювання. Для захисту від них використовують особливо важкі бетони класів С 8/10; С 12/15. В'язучими служать портландцемент, шлакопортландцемент, глиноземистий цемент та ін. Як заповнювачі застосовують матеріали підвищеної щільності – барит, лимоніт, магнетит, чавунний скрап, обрізки сталі, на яких можна отримати бетон із середньою щільністю від 2800 до 5000 кг/м<sup>3</sup>.

Останні дослідження [1-3, 9] показали, що дуже ефективними матеріалами радіаційного захисту є матеріали у вигляді полідисперсних систем, до складу яких входять ультрадисперсні частинки (УДЧ) розміром менше 1 мкм. Проте труднощі полягають у тому, щоб

рівномірно розподілити ультрадисперсні частинки обсягом матеріалу, що різко знижує його захисні функції.

У роботах [10, 11] показано, що фізико-механічні, гідрофізичні та навіть електрофізичні властивості бетонів і композиційних матеріалів переважно залежать від товщини і структури прошарків між частинками заповнювачів, мінеральних добавок, клінкерних реліктів. Тому під час розроблення композиційних матеріалів із заданими властивостями, у т. ч. радіаційно-захисних, доцільно досліджувати залежності цих властивостей від коефіцієнтів розсунення зерен заповнювачів і аналогічних характеристик і використовувати ці залежності для визначення складів матеріалів.

#### **Формулювання мети дослідження.**

Існують ефективні матеріали для захисту від гамма-випромінювання у вигляді сухих будівельних сумішей або спеціальних бетонів, що належать до будівельних матеріалів, призначених для захисту технічних засобів і людини в медичних, виробничих, наукових, адміністративних і житлових приміщеннях від впливу іонізуючих випромінювань. Такі суміші містять як заповнювачі шунгіт, барит, серпентинітовий щебінь або гальку, борати, силікати і гідросилікати свинцю та барію тощо. Подібні мінерали досить рідкісні і не завжди доступні. Склади таких композицій забезпечують захисні властивості від радіаційного випромінювання за рахунок компонентів, що містять важкі та легкі атоми. Однак застосування їх обмежене лише функціями радіаційного захисту.

Тому актуальним стає питання створення важкого водонепроникного бетону з підвищеними радіаційно-захисними властивостями.

**Метою роботи** є створення цементного композита з підвищеними гідрофізичними та радіаційно-захисними властивостями, для забезпечення яких необхідно, по-перше, модифікувати цементе в'язуче хімічними добавками, що



будуть синтезувати кристалогідрати з великим вмістом води; по-друге, залучити до складу полідисперсні системи у вигляді залізистих кварцитів, у яких мікронні частинки заліза вкраплені у кварцити, що сприятиме рівномірному розподілу мікронних частинок заліза в об'ємі композита.

**Виклад основного матеріалу.**

Проведено аналіз можливих заповнювачів з атомами важких елементів з відходів виробництва, що містяться у великих кількостях на території України. Як такий заповнювач було обрано залізисті кварцити, які є відходами рудничного збагачення та містять у своєму складі від 12 до 23 % заліза. Було взято проби з хвостосховища комбінату. Дисперсний склад кварцитів і його істинна густина змінювалися залежно від глибини відбору проб. Розмір частинок кварцитів становив

0,16–0,20 мм (рис. 1), а істинна густина складала 2,81–3,0 г/см<sup>3</sup>.

Мінералогічний склад залізистих кварцитів має середню густину 1900–2400 кг/м<sup>3</sup>, складається з кварцу, бідних зростків кварцу з гематитом, магнетитом і сидеритом із включенням малих частинок (%) вільних зерен магнетиту, гематиту і зростків рудних мінералів. Гранулометричний і хімічний склад наведено в табл. 1, 2.

Для отримання бетону з підвищеними радіаційно-захисними характеристиками було застосовано полідисперсні системи, до складу яких входять ультрадисперсні частинки атомів важких елементів, розмір яких коливається в межах 1 мкм, що забезпечує інтенсивне поглинання рентгенівського та γ-випромінювання [1, 3, 4, 9, 12, 13].

Таблиця 1

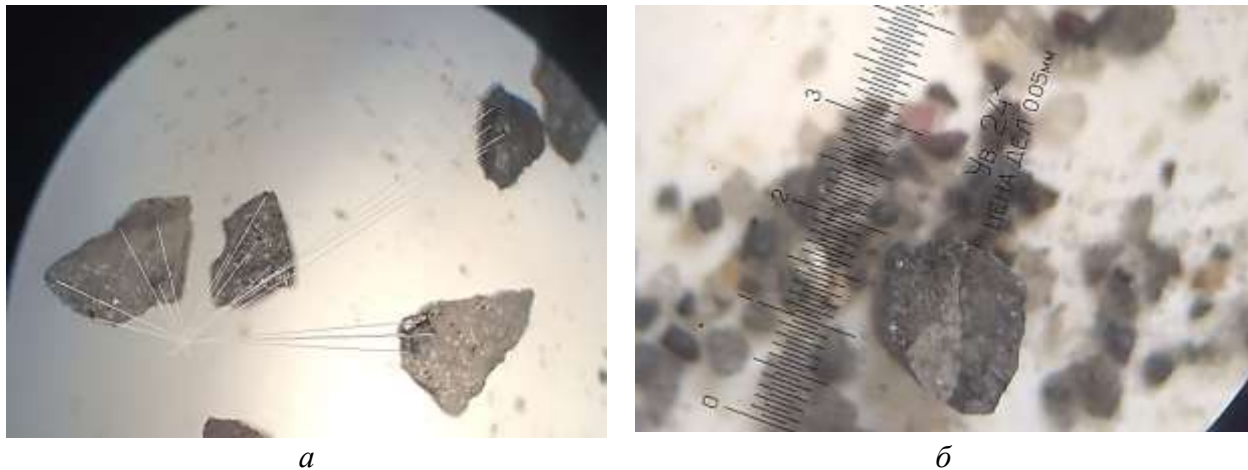
Гранулометричний склад залізистих кварцитів

Показник	Розмірність	Залишки на ситах, % за масою				Пройшло крізь сито 0,08
		0,63	0,35	0,16	0,08	
Часткові залишки	%	1	14	34	25	26

Таблиця 2

Хімічний склад залізистих кварцитів

Показник	Склад залізистих кварцитів, %
SiO <sub>2</sub>	67,5–68,5
Fe	13,3–14,0
FeO	12,3–12,6
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,2–5,9
CaO	2,0–2,4
MgO	3,5–4,6
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,8–1,0
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,03–0,04
SO <sub>2</sub>	0,22–0,275
ППП	5,4–6,3
MnO	0,09–0,102
TiO <sub>2</sub>	0,030–0,035



*a*

*б*

Рис. 1. Залізисті кварцити:

*a* – залізисті кварцити зі збільшенням  $\times 24$ , стрілками позначені вкраплення заліза;  
*б* – середній розмір частинок залізистих кварцитів

Отже, вкраплені частинки мікронного розміру важких атомів заліза, гематиту і магнетиту в залізистих кварцитах і будуть саме полідисперсними частинками, які забезпечуватимуть поглинання радіаційного випромінювання. А вкраплення цих частинок у зерна кварциту сприятиме рівномірному розподілу важких елементів (заліза, гематиту, магнетиту) у цементному композиті.

Також було проведено дослідження щодо вибору добавок до в'язучого, які дадуть змогу збільшити кількість гідратних новоутворень, що містять значну кількість легких атомів (водню). Було обрано склад хімічних добавок, що дали змогу при гідратації цементу додатково синтезувати сполуки зі значним вмістом легких атомів. Такими сполуками є гідросульфоалюмінати кальцію, гідрохлоралюмінати кальцію, гідрокарбоалюмінати кальцію, гідронітроалюмінати кальцію, портландиту, низькоосновних гідросилікатів кальцію та інших кристалогідратів, що містять водень. Крім того, синтез цих сполук у цементному камені забезпечує підвищення його щільності і водонепроникності. Як в'язуче було використано портландцемент ПЦ І-500.

Фізико-механічні та гідрофізичні властивості досліджено стандартними

методами відповідно до ДСТУ Б В.2.7-126:2011 «Будівельні матеріали. Суміші будівельні сухі модифіковані. Загальні технічні умови»; ДСТУ Б В.2.7-23-95 «Розчини будівельні. Загальні технічні умови»; ДСТУ Б В.2.7-214:2009 «Будівельні матеріали. Бетони. Методи визначення міцності за контрольними зразками». Тріщиностійкість композитів визначалася шляхом визначення поздовжніх деформацій індикаторами вартового типу. Склад продуктів гідратації цементу досліджено фізико-хімічними методами рентгенофазового аналізу та інфрачервоної спектроскопії, мікроструктурний аналіз – методами світлової та електронної мікроскопії.

**Результати досліджень.** Для отримання фізико-механічних характеристик із розробленого складу були виготовлені такі зразки: для фізико-механічних випробувань – зразки балок розміром  $40 \times 40 \times 160$  мм; проведення гідрофізичних випробувань – зразки плит розміром  $200 \times 200 \times 50$  мм. Отримані зразки бетону було витримано в нормально-вологісних умовах, результати досліджень узагальнено в табл. 3.

Таблиця 3

Таблиця результатів фізико-механічних випробувань складу бетону

Номер з/п	Показник	Склад бетону	
		Контрольний зразок, що не містить компонентів важких і легких атомів	Бетон зразка розробленого складу
1	Терміни тужавіння, год, хв, не більше:		
	початок	5 <sup>46</sup>	3 <sup>12</sup>
	кінець	8 <sup>36</sup>	7 <sup>45</sup>
2	Водоутримувальна здатність, %	97,3	98,8
3	Розшарування, %, не більше	2,0	1,5
4	Щільність суміші, г/см <sup>3</sup>	2,03	2,68
5	Межа міцності при стисканні, не менше, МПа	27,0	49,8
6	Межа міцності при згинанні, не менше, МПа	4,1	12,6
7	Адгезія до бетонної поверхні, не менше, МПа	0,5	2,5
8	Морозостійкість, не менше, цикли	100	300
9	Тріщиностійкість за усадковими деформаціями для шару 2–5 мм	без тріщин	без тріщин
10	Водопоглинання, %, не більше	5,2	1,2
11	Марка за водонепроникністю, W, для шару на бетоні:		
	5–10 мм;	6	16
	2–3 мм	4	12
12	Ударна міцність, Дж/см <sup>3</sup>	5,4	15,5

Фізико-хімічні дослідження продуктів гідратації цементного каменю проводили методами рентгеноструктурного, диференційно-термічного та електронно-мікроскопічного аналізів. Рентгеноструктурні дослідження проб досліджуваних матеріалів проводили за допомогою рентгенівського дифрактометра ДРОН-1,5. Використовували фільтроване випромінювання Си-анода. Прискорювальна напруга становила 35 кВ, струм на аноді – 20 мА.

Електронно-мікроскопічні дослідження структури цементного каменю проводили за допомогою сканувального електронного мікроскопа Jeol JSM-6390/6390LV (Японія), а також на одноступінчастих вугільних репліках за

допомогою електронного мікроскопа Jeol (Японія), що просвічує. Діапазон збільшення – від  $\times 8$  до  $\times 300000$ .

Результати рентгеноструктурного аналізу свідчать, що в розроблених складах, на відміну від контрольного зразка, спостерігаються дифракційні піки кальциту ( $\text{CaCO}_3$ ), низькоосновних і високоосновних гідросилікатів кальцію типу ксонотліту, гілебрандиту, тобермориту, а також гідрооксихлориду кальцію, еtringіту.

На рис. 2 і 3 наведено результати інфрачервоної спектроскопії (ІЧС) цементного каменю. Поглинання області  $3400 \text{ см}^{-1}$  характеризує наявність у цементній пасті та цементному камені Si-OH груп, інтервал  $1400\text{-}1460 \text{ см}^{-1}$  лінії

відповідає коливанням вільної (хімічно незв'язаної) води, інтервал 900-1000  $\text{cm}^{-1}$  відповідає зв'язкам Si-O-Si гідросилікату

кальцію – основним носіям міцності цементного каменю.

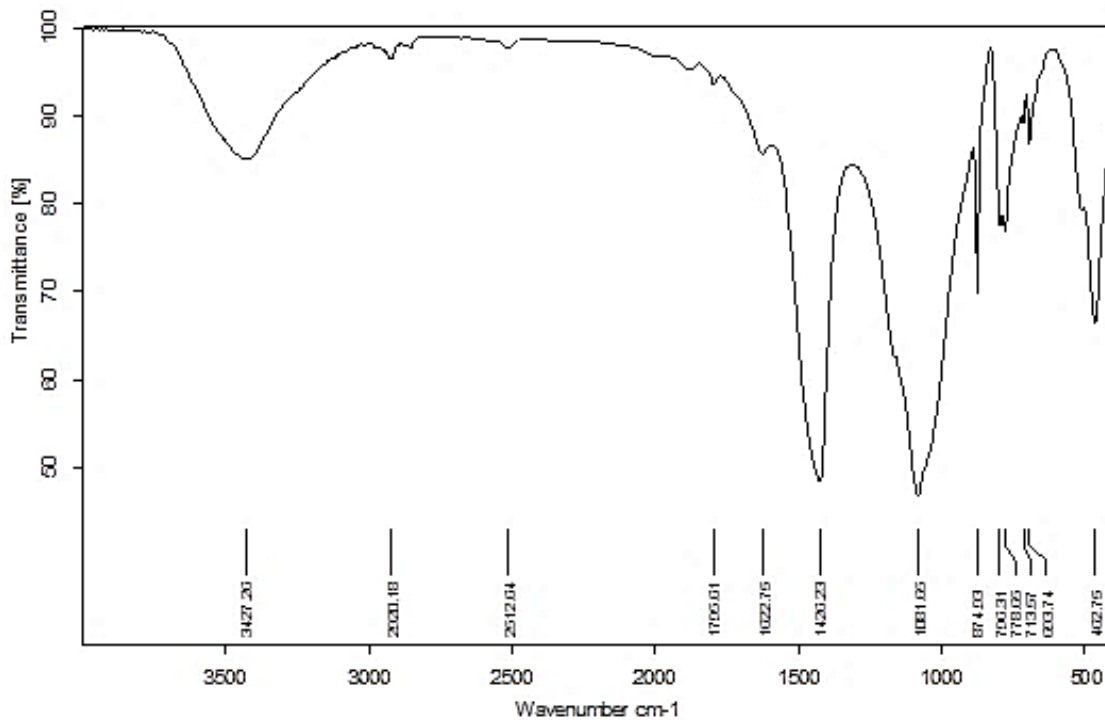


Рис. 2. ІЧ-спектри контрольного зразка

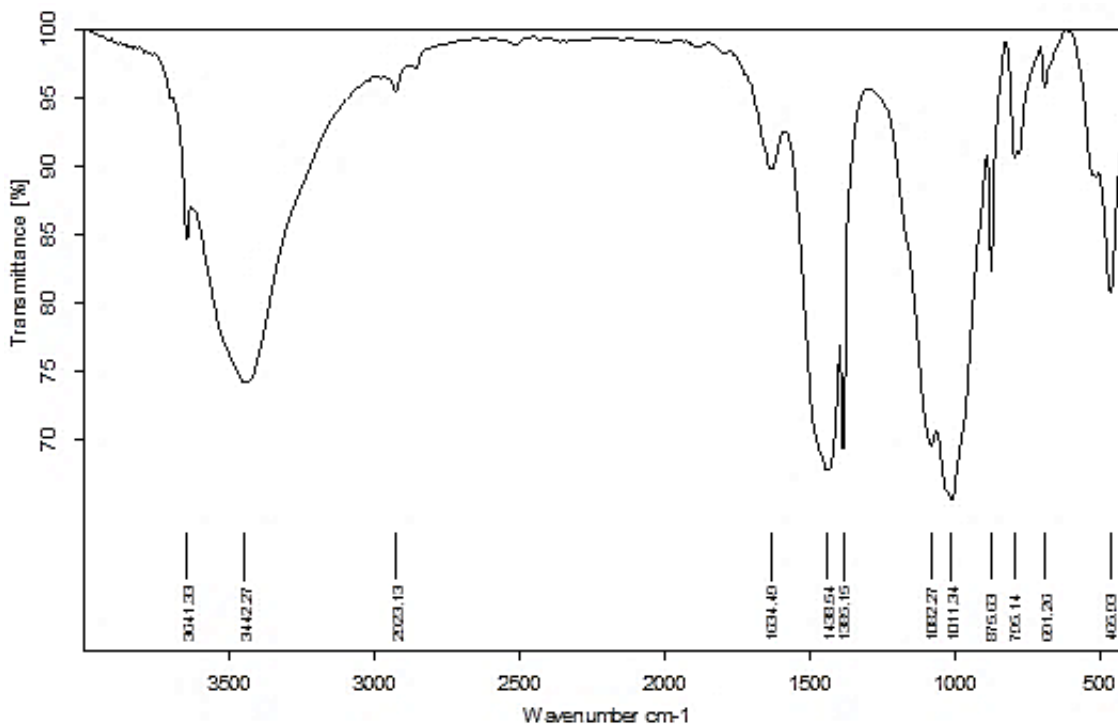


Рис. 3. ІЧ-спектри зразка розробленого складу

Зміщення ліній у розроблених складах в інтервалі  $900-1000\text{ см}^{-1}$  у бік великих значень свідчить про більшу міру полімеризації гідросилікатів кальцію, що впливає на міцність і водонепроникність складів. Інтенсивність ліній у діапазоні  $3000-4000\text{ см}^{-1}$  свідчить про наявність Si-OH груп у цементному камені, і більша інтенсивність їх у розробленому складі свідчить про те, що модифікований цементний камінь характеризується вищою питомою поверхнею гідратних новоутворень. Тобто такий цементний камінь містить більше зв'язаної води, а

отже, і більше легких атомів водню, крім того, міцність і водонепроникність такого складу вищі.

Дослідження мікрофотографій структури розробленого складу підтвердило, що, на відміну від контрольного зразка (рис. 4), він має більш щільну структуру (рис. 5), містить значну кількість еtringіту та інших гідроалюмінатів кальцію, що видно при збільшенні у  $\times 3000$  (рис. 5), на відміну від контрольного зразка. Крім того, видно повстяні новоутворення на рис. 5 низькоосновних гідросилікатів кальцію.

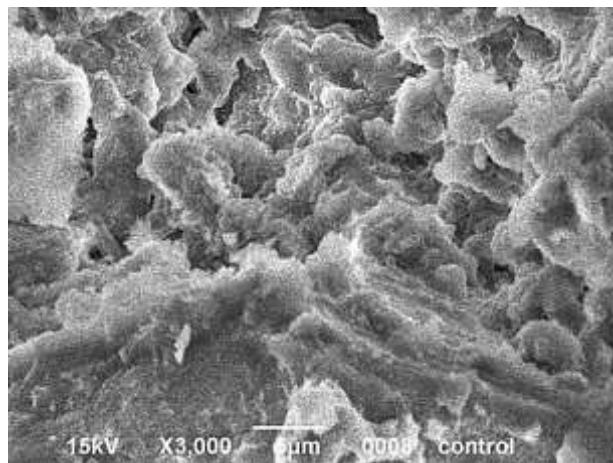
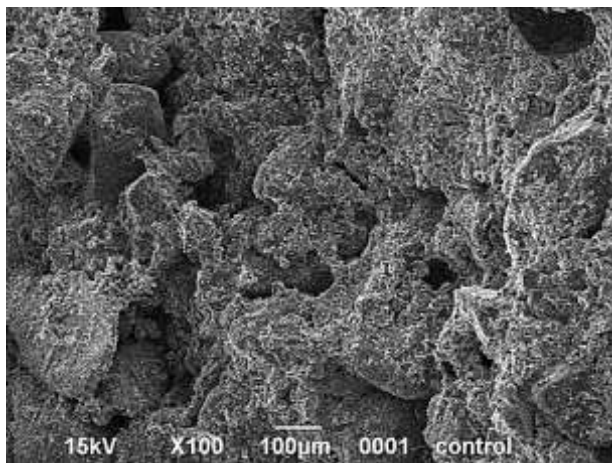


Рис. 4. Мікрофотографії структури контрольного зразка

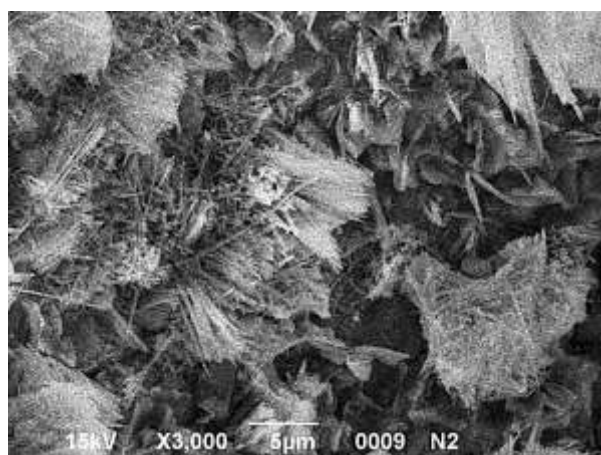
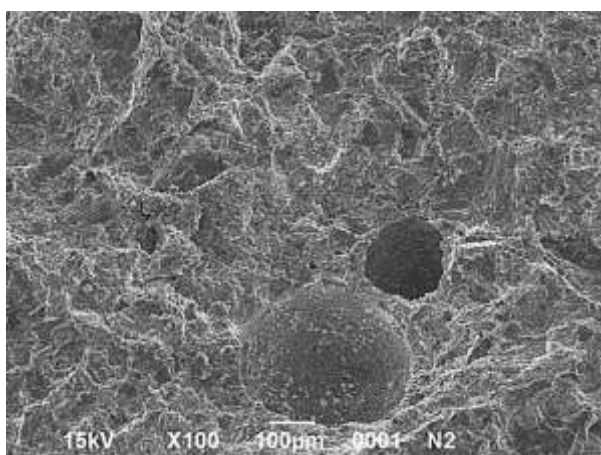


Рис. 5. Мікрофотографії структури зразка розробленого складу

**Висновки.** Розроблений склад дрібнозернистого бетону має високі експлуатаційні, гідрофізичні властивості, забезпечує захисні властивості від радіаційного випромінювання за рахунок

компонентів, які містять важкі та легкі атоми, що дає змогу застосовувати цей матеріал для захисту будівельних конструкцій, будівель і споруд.

### Список використаних джерел

1. Ouda A. S. Development of high-performance heavy density concrete using different aggregates for gamma-rayshielding. *Prog.Nucl.Energy*. 48 CE 55. Vol. 79. March 2015. P. 48-55. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2014.11.009> (last access: 10.11.2023).
2. Obaid S. S., Gaikwad D. K., Pawar P. P. Determination of gamma ray shielding parameters of rocks and concrete. *Radiation Physics and Chemistry*. Vol. 144. March 2018. P. 356-360. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0969806X17300889> (last access: 10.11.2023).
3. Azeez A. B. The effect of various waste materials' contents on the attenuation level of anti-radiation shielding concrete. *Materials*. 6 (10). 2013. P. 4836-4846. URL: <https://doi.org/10.3390/ma6104836> (last access: 10.11.2023).
4. Павленко В. І., Матюхін П. В. Основні аспекти розробки сучасних радіаційно-захисних конструкційних металокомпозиційних матеріалів. Сучасні наукомісткі технології. 2005. № 10. С. 85–86. URL: <https://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=23690> (дата звернення: 10.11.2023).
5. Про механізм створення речовин із підвищеними радіаційно-захисними властивостями / В. А. Білоус, Є. А. Джур, Ю. А. Крикун та ін. *Питання атомної науки та техніки*. № 3. Серія: Фізика радіаційних пошкоджень та радіаційне матеріалознавство. (86). 2005. С. 188–189.
6. Христич О. В., Лемешев М. С. Формування мікроструктури бетонів для захисту від іонізуючого випромінювання. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2. (1998). 18–23.
7. Plugin A. A., Pluhin O. A., Kasyanov V. V., Dyomina O. I., Bondarenko D. O. Portland cement-based penetrating electrically conductive composition for protection against electrocorrosion. *Functional Materials*. 28 (1). (2021). 121-130. URL: <https://doi.org/10.15407/fm28.01.121> (last access: 10.11.2023).
8. Plugin A., Rucińska T., Borziak O., Pluhin O., Zhuravel V. Electrically Conductive Silicate Composite for Protection against Electrocorrosion. *Minerals*. 13 (5). (2023). 610. URL: <https://doi.org/10.3390/min13050610> (last access: 10.11.2023).
9. Tamayo P., Thomas C., Rico J., Setien J., Polanco J., Perez S. and Mananes S. Radiological shielding concrete using steel slags. *Waste and Byproducts in Cement-Based Materials*. January 2021. P. 413–438.
10. Основы теории твердения, прочности, разрушения и долговечности портландцемента, бетона и конструкций из них. Т. 3. Теория прочности, разрушения и долговечности бетона, железобетона и конструкций из них / А. Н. Плугин, А. А. Плугин, О. А. Калинин и др.; под ред. А. Н. Плугина. Київ: Наукова думка, 2012. 288 с. URL: <https://is.gd/U1rAcZ> (дата звернення: 10.11.2023).
11. Pluhin O., Plugin A., Plugin D., Borziak O., Dudin O. The effect of structural characteristics on electrical and physical properties of electrically conductive compositions based

on mineral binders. *Matec Web of Conference*. 116 (2017) 01013. URL: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201711601013> (last access: 10.11.2023).

12. Довідник хіміка 21. Хімія та хімічна технологія. URL: <https://chem21.info/page/179217240188189237200029116052204173015184140166/> (дата звернення: 10.11.2023).

13. Явище аномального послаблення рентгенівського випромінювання ультрадисперсними середовищами / В. І. Ткаченко, В. А. Юпенков, Ю. А. Крикун та ін. *Наукові відкриття вчених України*. Київ, 2004. 58 с.

---

Костюк Тетяна Олександрівна, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Тел.: +38(050)6528219. E-mail: [takostuk@ukr.net](mailto:takostuk@ukr.net).

Плугін Андрій Аркадійович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри залізничної колії і транспортних споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Тел.: +38(057)7301058. E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Плугін Дмитро Артурович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Тел.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: [plugin.da@kart.edu.ua](mailto:plugin.da@kart.edu.ua).

Бондаренко Олександр Іванович, кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних споруд і гідротехнічного будівництва, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486. Тел.: +38(050)6518773. E-mail: [oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua).

Деденьова Олена Борисівна, старший викладач кафедри матеріалознавства та інженерії композитних конструкцій, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792. Тел.: +38(097)414-12-24. E-mail: [alena.dedenyova@gmail.com](mailto:alena.dedenyova@gmail.com).

Kostyuk Tetiana, Dr. Sc. (Tech.), Senior Researcher, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-9246-2899. Tel.: +38(050)6528219. E-mail: [takostuk@ukr.net](mailto:takostuk@ukr.net).

Plugin Andrii, Professor, Head of the Department of Railway Tracks and Transport Facilities, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-6941-2076. Tel.: +38(057)7301058. E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Plugin Dmytro, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Building Materials and Structures, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID ID: 0000-0002-4359-4369. Tel.: +38 (057) 730-10-63. E-mail: [plugin.da@kart.edu.ua](mailto:plugin.da@kart.edu.ua).

Bondarenko Oleksandr, PhD (Tech), Department of Geotechnics, Underground Structures and Hydraulic Engineering O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0002-5640-6486. Тел.: +38(050)6518773. E-mail: [oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua](mailto:oleksandr.bondarenko2@kname.edu.ua).

Dedenova Olena, Senior Lecturer, Department of Materials Science and Engineering of Composite Structures, O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. ORCID ID: 0000-0001-7801-0792. Тел.: +38(097)4141224. E-mail: [alena.dedenyova@gmail.com](mailto:alena.dedenyova@gmail.com).

Статтю прийнято 9.12.2023 р.

УДК 624.012.35:620.173/174

## ОПІР СТИСНУТОГО БЕТОНУ ДІЇ ТРИВАЛИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Канд. техн. наук О. В. Ромашко-Майструк, д-р техн. наук В. М. Ромашко

## RESISTANCE OF COMPRESSED CONCRETE TO LONG-TERM LOADS

PhD(Tech.) O. V. Romashko-Maistruk, Dr. Sc.(Tech.) V. M. Romashko

**Анотація.** Стаття стосується основних закономірностей і особливостей деформування стиснутого бетону за дії тривалих навантажень. Основні зусилля спрямовані на встановлення аналітичної залежності з визначення рівня тривалої міцності стиснутого бетону. Здійснено критичний аналіз існуючих на сьогодні залежностей з його розрахунку. Отримано функціональну залежність рівня тривалої міцності стиснутого бетону не тільки від його стандартизованих пружно-пластичних характеристик, але і швидкості деформування бетону. Оцінювання запропонованої методики визначення рівня тривалої міцності стиснутого бетону зведено до порівняння результатів відповідних теоретичних розрахунків з оприлюдненими експериментальними даними різних дослідників.

**Ключові слова:** бетон, енергетична модель, питома потенціальна енергія, швидкість деформування, тривалі навантаження, рівень тривалої міцності.

**Abstract.** This article deals with the main regularities and features of compressed concrete deformation under the action of long-term loads. The main efforts are aimed at establishing an analytical dependence on determining the long-term strength level of compressed concrete. A critical analysis of the currently existing dependencies based on its calculation was carried out. These studies are based on the general provisions and hypotheses of the previously developed energy model of concrete and reinforced concrete deformation.

The defining hypothesis of the specific potential energy invariance of the concrete ultimate deformation (destruction) and its independence from the loading mode of the concrete itself was used. The specific potential energy of compressed concrete deformation at the moment of its destruction under three loading modes is considered: instantaneous dynamic, standardized short-term and long-term. The level of compressed concrete long-term strength is related to the dynamic increase factor limit values ( $DIF_u$ ) under the instantaneous loading mode. In turn, the compressed concrete dynamic increase factor is functionally related to the generally recognized coefficient of compressed concrete standardized elastic-plastic properties under a short-term loading regime. In this way, the functional dependence of the level of compressed concrete long-term strength was obtained not only on its standardized elastic-plastic characteristics, but also on the rate of concrete deformation or on the rate of its loading. The evaluation of the proposed methodology for determining the level of compressed concrete long-term strength is reduced to a comparison of the relevant theoretical calculations results with the various researchers' published experimental data.

**Keywords:** concrete, energy model, specific potential energy, rate of deformation, long-term loads, level of long-term strength.

**Вступ.** Перші серйозні дослідження тривалої міцності стиснутого бетону були проведені ще наприкінці 30-х років

минулого століття [1]. Однак у сучасних нормах проектування ще й досі відсутні чіткі та достатньо обґрунтовані



рекомендації щодо врахування впливу тривалих навантажень у розрахунках залізобетонних елементів за граничними станами. І тут ідеться не тільки про максимально безпечні рівні тривалого навантаження, але і режими прикладання (створення) цих навантажень. Адже цілком очевидно, що зміна швидкості прикладання навантаження або швидкості деформування бетону призводить не тільки до зміни безпечного рівня тривалого навантаження, але і зміни деформаційних можливостей стиснутого бетону. Інакше кажучи, рівень

тривалої міцності стиснутого бетону та його критичні (граничні) деформації залежатимуть не тільки від класу самого бетону, але і швидкості його деформування (рис. 1). А оскільки реальні режими прикладання експлуатаційних навантажень є доволі тривалими, то встановлення подібних залежностей між параметрами стиснутого бетону матиме важливе значення для побудови універсальної моделі деформування бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій.

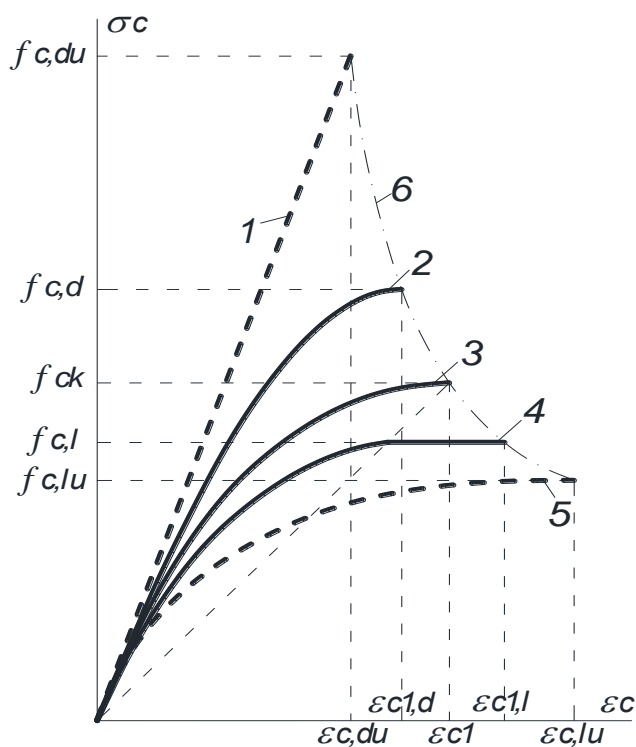


Рис. 1. Діаграми деформування стиснутого бетону  $\sigma_c - \varepsilon_c$  за різних видів і режимів навантаження: 1 – миттєвого; 2 – динамічного; 3 – короткочасного; 4 – тривалого; 5 – довготривалого; 6 – крива граничних деформацій

#### Аналіз останніх досліджень.

Дослідження тривалої міцності стиснутого бетону стали одними з визначальних у теорії залізобетону, відколи йдеться про практичне проєктування залізобетонних елементів і конструкцій. Тому й не дивно, що найбільш активні дослідження в цьому

напрямку розпочалися саме в 30-60-х роках минулого століття [1-4]. Найгрунтовнішими серед них стали вишукування Рюша Н. [4, 5], які стосувалися в основному бетонів низьких і середніх класів міцності. Вони, як і всі дослідження цього періоду, показали, що навіть за тривалого віку рівень тривалої

міцності бетонів низьких класів не перевищував 0,75, а бетонів середніх класів був нижчим 0,8. Встановлено також, що за таких рівнів постійного навантаження навіть подальша тривала гідратація цементного каменю в бетоні раннього віку не здатна зупинити процес його руйнування в кінцевому випадку. Водночас зазначено, що за відносно помірних рівнів напружень у стиснутому бетоні ( $\sigma / f_c = 0,4 \dots 0,6$ ) спостерігається незначний позитивний вплив тривалого навантаження на його міцність.

Хоча Рюш Н. і розробив першу концепцію тривалої міцності бетону, однак він так і не запропонував певної аналітичної залежності для визначення цієї міцності. Пізніше таке завдання спробував

вирішити Яшин А. В. [6], однак рекомендована ним логарифмічна залежність, що пов'язувала міцність стиснутого бетону з тривалістю дії постійного навантаження, була надто примітивною. Вона не враховувала впливу цілої низки важливих технологічних і вікових факторів, а також основних складових компонентів бетону на його тривалу міцність.

Подальші дослідження тривалої міцності стиснутого бетону [7-12] уже стосувалися не тільки низьких і середніх класів бетону, але й надміцних бетонів. Згодом результати цих досліджень були відображені як у більш ранніх [13], так і нині чинних нормативних документах [14] доволі складною логарифмічно-експоненційною залежністю

$$\eta_l = (0,96 - 0,12 \cdot (\ln(72 \cdot (t - t_0)))^{1/4}) \cdot \exp(s \cdot (1 - \sqrt{28/t_0})), \quad (1)$$

де  $\eta_l$  – рівень тривалої міцності бетону;

$t - t_0$  – тривалість дії навантаження;

$t_0$  – вік бетону на момент його завантаження;

$s$  – коефіцієнт, що залежить від класу цементу (R, N, S).

Відносно простою видається залежність, отримана в дослідженні [15],

$$\eta_l = 0,85 - 0,15 \cdot \varphi(t - t_0), \quad (2)$$

де  $\varphi(t - t_0)$  – емпірична функція, що враховує тривалість дії навантаження на міцність бетону.

Та все ж таки вона є надто примітивною, оскільки не враховує впливу цілої низки важливих факторів на тривалу міцність бетону. Але її основний недолік полягає в тому, що вона є чисто емпіричною.

Не менш складною для використання у практичних розрахунках виявилася залежність, запропонована в роботі [16],

$$\gamma(t - t_0) = \frac{R_0}{R(t_0)} \cdot \sqrt{\frac{1 + E(t) \cdot C^*(t, t)}{1 + E(t) \cdot C^*(t, t_0)}}, \quad (3)$$

де  $\gamma(t - t_0)$  – рівень тривалої міцності бетону;

$R_0$  – прогнозована міцність бетону у старому віці ( $t \rightarrow \infty$ );

$R(t_0)$  – міцність бетону на момент його завантаження;

$E(t)$  – модуль пружності бетону у віці його руйнування;

$C^*(t, t)$  – міра повзучості бетону у віці його руйнування;

$C^*(t, t_0)$  – міра повзучості бетону у віці його завантаження.

Основним недоліком функції (3) є те, що користування нею неможливе без знання основних фізико-механічних характеристик бетону у віці 28 діб, на момент його завантаження та руйнування, а також у віці  $t \rightarrow \infty$ . Тому переважна більшість дослідників [17, 18] продовжують і надалі віддавати перевагу нормативній залежності (1).

Отже, зважаючи на все вищесказане, можна стверджувати, що дослідження, пов'язані з опором стиснутого бетону дії тривалих навантажень, залишатимуться й надалі одними з найбільш актуальних у загальній теорії залізобетону.

**Постановка мети і задач досліджень.** Стаття спрямована на розроблення ключових положень загальної моделі деформування стиснутого бетону за дії тривалих навантажень. Основним завданням є отримання аналітичної залежності рівня тривалої міцності стиснутого бетону. Вона має забезпечити простий підхід до врахування впливу тривалого навантаження на поведінку стиснутого бетону як з позицій його міцності, так і здатності до граничного можливого деформування при реальному проектуванні залізобетонних елементів і конструкцій. Базовою для такого підходу може бути раніше розроблена енергетична модель [19, 20], що ґрунтується на загальних закономірностях збереження потенціальної енергії деформування матеріалів за різних режимів їхнього завантаження.

#### Основний матеріал досліджень

**Методика досліджень.** В основу досліджень покладено найважливіші закономірності фізико-математичного моделювання процесів деформування бетонних і залізобетонних елементів і конструкцій [21-23] і загальновідомий закон збереження питомої потенціальної енергії деформування матеріалу незалежно від режиму його навантаження.

**Результати досліджень.** Загальновідомо, що такі фізико-механічні характеристики бетону, як міцність на стиск  $f_c$  і розтяг  $f_{ct}$  і відповідні їм критичні деформації  $\varepsilon_{c1}$  і  $\varepsilon_{ct1}$  значною мірою залежать від швидкості його завантаження або деформування (рис. 1). Цілком очевидно, що чим меншою буде швидкість деформування бетону, тим нижчою буде його міцність і більшими будуть граничні (критичні) деформації бетону в момент його руйнування. Водночас відомо, що добуток двох вищевказаних параметрів характеризує питому потенціальну енергію деформування бетону. А, за законом збереження потенціальної енергії, вона має залишатися незмінною та незалежною від режиму завантаження самого матеріалу. Інакше кажучи, площа діаграми деформування стиснутого бетону залишатиметься сталою або незмінною за будь-якого типу навантаження: миттєвого, короткочасного чи довготривалого (рис. 2).

У разі миттєвого завантаження бетон буде деформуватися пружно, оскільки пластичні деформації або деформації повзучості проявитися не встигнуть. За таких обставин питому потенціальну енергію деформування стиснутого бетону на момент його руйнування можна обчислити за дуже простим виразом [24]

$$u_d = f_{c,du}^2 / (2 \cdot E_{co}), \quad (4)$$

де  $E_{co}$  – початковий модуль пружності бетону за напружень  $\sigma_c = 0$ ;

$f_{c,du}$  і  $\varepsilon_{c,du}$  – міцність стиснутого бетону та відповідні їй критичні (граничні) деформації бетону за миттєвого динамічного завантаження.

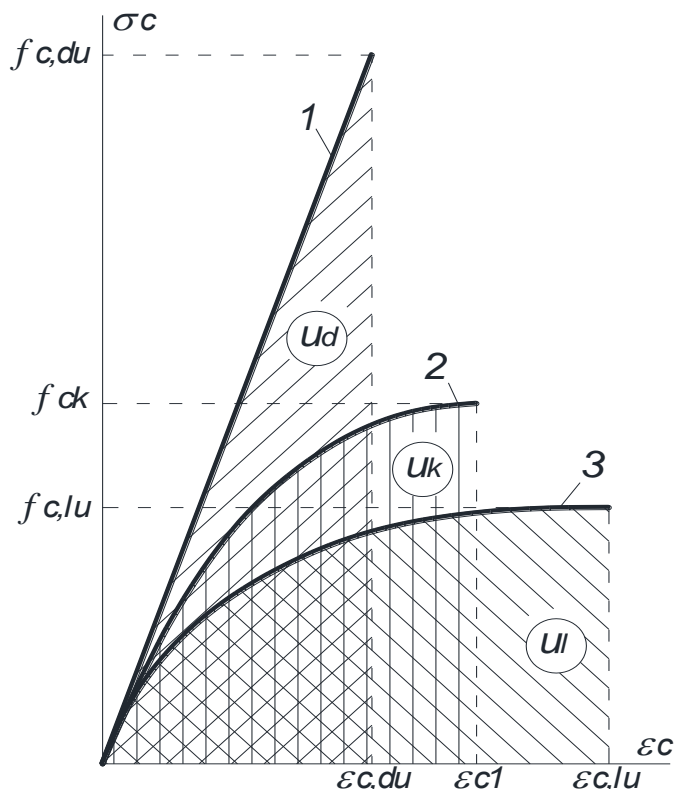


Рис. 2. Епюри питомої потенціальної енергії руйнування бетону при завантаженні: 1 – миттєвому динамічному; 2 – стандартизованому короткочасному; 3 – довготривалому

У випадку короткочасного квазістатичного режиму завантаження або деформування, що описується

неправильною дробово-раціональною функцією  $\sigma_c - \varepsilon_c$  [22, 23], цю енергію слід обчислювати за виразом [24]

$$u_k = \frac{dU}{dV} = \int_0^{\varepsilon_{c1}} \sigma_c d\varepsilon_c = \frac{f_{ck} \cdot \varepsilon_{c1}}{(k-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left( \frac{k-1}{k-2} \right)^2 \cdot \ln(k-1) \right], \quad (5)$$

де  $\varepsilon_c$  – поточні деформації стиснутого бетону;

$f_{ck}$  і  $\varepsilon_{c1}$  – міцність і критичні деформації стиснутого бетону за дії стандартизованих статичних навантажень;

$k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$  – характеристика деформативності стиснутого бетону.

За аналогічним виразом можна було б визначати і питому потенціальну енергію руйнування стиснутого бетону за дії тривалого навантаження

$$u_l = \int_0^{\varepsilon_{c,lu}} \sigma_c d\varepsilon_c = \frac{f_{c,lu} \cdot \varepsilon_{c,lu}}{(k_l-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(k_l-1)^2}{(k_l-2)} - \left( \frac{k_l-1}{k_l-2} \right)^2 \cdot \ln(k_l-1) \right], \quad (6)$$

де  $f_{c,lu}$  і  $\varepsilon_{c,lu}$  – граничні значення тривалої міцності та відповідні їй критичні деформації стиснутого бетону;

$k_l = E_{co} \cdot \varepsilon_{c,lu} / f_{c,lu}$  – характеристика граничної деформативності стиснутого бетону за дії тривалих навантажень.

$$DIF_u = \frac{f_{c,du}}{f_{ck}} = \sqrt{\frac{2 \cdot k}{(k-2)} \left[ -\frac{1}{2} + \frac{(k-1)^2}{(k-2)} - \left( \frac{k-1}{k-2} \right)^2 \ln(k-1) \right]}. \quad (7)$$

Функція (7) характеризує граничну міцність стиснутого бетону за його миттєвого деформування. Зі зменшенням швидкості деформування ( $\dot{\varepsilon}$ ) коефіцієнт динамічного зміцнення теж буде зменшуватися і при  $\dot{\varepsilon} = 10^{-6} \text{ c}^{-1}$  досягне рівня тривалої міцності стиснутого бетону  $DIF = \eta_l = 1$ .

Цілком очевидно, що подальше зниження рівня тривалої міцності стиснутого бетону відбуватиметься за подальшого зменшення швидкості його деформування. За допомогою методів числового аналізу цей процес вдалося пов'язати залежністю

$$\eta_l = DIF_u^{(\log(\dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_s) + 1) / 9} \quad \text{для } \dot{\varepsilon} \leq 10^{-6} \text{ c}^{-1}, \quad (8)$$

де  $\dot{\varepsilon}_s$  – максимальна швидкість деформування стиснутого бетону за дії квазістатичних навантажень,  $\dot{\varepsilon}_s = 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ .

Однак основні параметри цієї залежності  $f_{c,lu}$  і  $\varepsilon_{c,lu}$  (як і  $k_l$ ) є невідомими, а тому визначити рівень тривалої міцності бетону зі спільного розв'язку рівнянь (5) і (6) практично неможливо. Проте зі спільного розв'язку рівнянь (4) і (5) було отримано залежність граничних значень коефіцієнта динамічного зміцнення стиснутого бетону [24]

Якщо найменшу швидкість деформування стиснутого бетону прийняти згідно з табл. 1 рівною  $\dot{\varepsilon} = 10^{-10} \text{ c}^{-1}$ , то найбезпечніший (мінімальний) рівень його тривалої міцності можна обчислювати за виразом

$$\eta_{lu} = DIF_u^{-4/9}. \quad (9)$$

Формула (8) показує, що рівень тривалої міцності стиснутого бетону залежить не лише від його фізико-механічних характеристик, відображених у  $DIF_u$  коефіцієнтом пружно-пластичних властивостей бетону  $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{c1} / f_{ck}$ , але і швидкості його деформування  $\dot{\varepsilon}$ . Значення рівнів тривалої міцності стиснутого бетону, обчислені за формулою (8) для різних його класів при різних швидкостях деформування, наведені в табл. 2.

Таблиця 1

Швидкість деформування стиснутого бетону залежно від типу навантаження

Тип навантаження	Швидкість деформування $\dot{\varepsilon}$ , $\text{c}^{-1}$
Тривалі ("повзучі")	$10^{-10} \dots 10^{-6}$
Статичні, квазістатичні	$10^{-6} \dots 10^{-5}$

Таблиця 2

Рівні тривалої міцності стиснутого бетону за різної швидкості його деформування ( $\dot{\epsilon}$ )

Клас бетону	C8/10	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/35	C32/40	C35/45
$\eta_l(\epsilon=10^{-8}c^{-1})$	0,794	0,808	0,823	0,835	0,845	0,854	0,863	0,869
$\eta_{lu}(\epsilon=10^{-10}c^{-1})$	<b>0,63</b>	<b>0,654</b>	<b>0,678</b>	<b>0,697</b>	<b>0,714</b>	<b>0,73</b>	<b>0,744</b>	<b>0,756</b>
Клас бетону	C40/50	C45/55	C50/60	C53/65	C56/70	C60/75	C65/80	C70/85
$\eta_l(\epsilon=10^{-8}c^{-1})$	0,878	0,884	0,89	0,896	0,901	0,907	0,912	0,916
$\eta_{lu}(\epsilon=10^{-10}c^{-1})$	<b>0,77</b>	<b>0,782</b>	<b>0,793</b>	<b>0,803</b>	<b>0,813</b>	<b>0,823</b>	<b>0,831</b>	<b>0,839</b>
Клас бетону	C75/90	C80/95	C85/100	C90/105	C95/110	C100/115	C105/120	
$\eta_l(\epsilon=10^{-8}c^{-1})$	0,921	0,924	0,928	0,932	0,935	0,939	0,941	
$\eta_{lu}(\epsilon=10^{-10}c^{-1})$	<b>0,848</b>	<b>0,854</b>	<b>0,862</b>	<b>0,868</b>	<b>0,874</b>	<b>0,881</b>	<b>0,886</b>	

Для оцінювання ефективності розробленої методики щодо визначення рівня тривалої міцності стиснутого бетону результати теоретичних розрахунків за виразом (8) були порівняні з експериментальними даними окремих

дослідників [1-8, 10, 12, 17]. Усі вони відображені на графіку рис. 3 і підтверджують, що нижню межу тривалої міцності стиснутого бетону доцільно прогнозувати за залежністю (9).

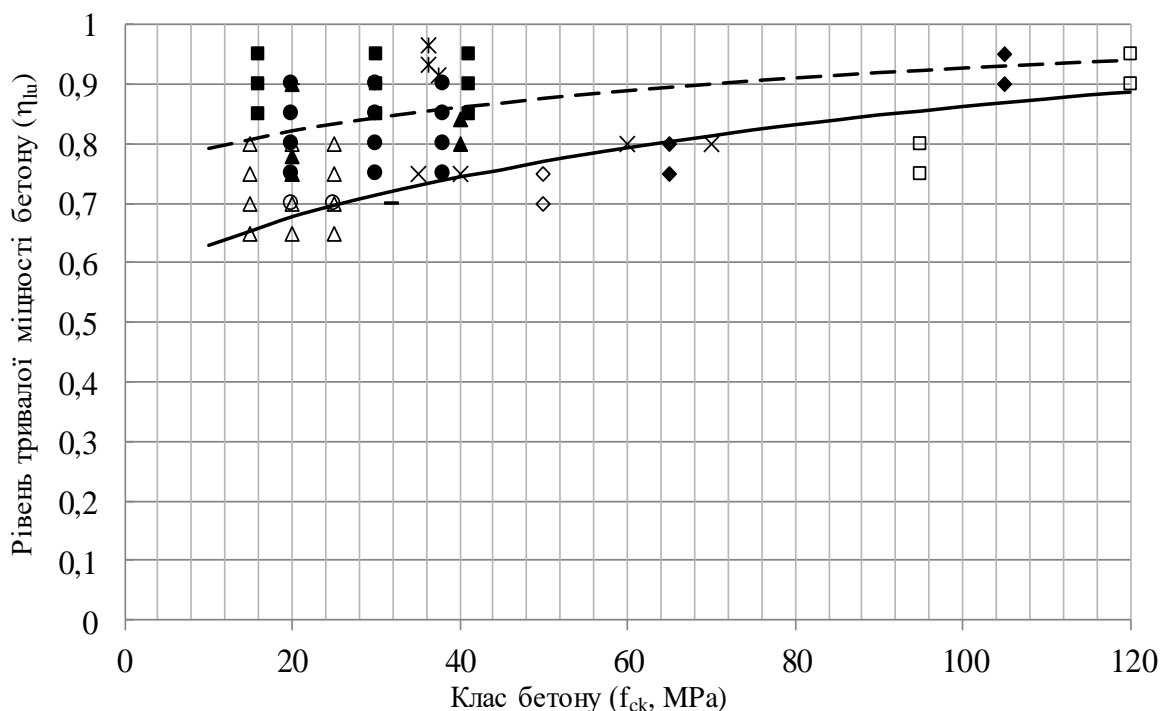


Рис. 3. Тривала міцність стиснутого бетону за результатами експериментів зі зруйнованими зразками ( $\blacktriangle$  - [1];  $+$  - [2];  $\bullet$  - [4, 5];  $\blacksquare$  - [7];  $\times$  - [10];  $\blacklozenge$  - [12];  $\ast$  - [17]) і незруйнованими зразками ( $-$  - [3];  $\triangle$  - [6];  $\diamond$  - [8];  $\circ$  - [10];  $\square$  - [12]); розрахунків за формулою (8) при швидкостях деформування  $\text{—}$  -  $\dot{\epsilon} = 10^{-10} c^{-1}$  і  $\text{---}$  -  $\dot{\epsilon} = 10^{-8} c^{-1}$

**Висновки.** Отже, завдяки раніше розробленим положенням і гіпотезам енергетичної моделі деформування бетону та залізобетону сформовано основи загальної моделі деформування бетону за дії тривалих навантажень. Вперше запропоновано аналітичну залежність, що пов'язує рівень тривалої міцності стиснутого бетону не лише з його визначальними пружно-пластичними стандартизованими характеристиками за дії короточасних навантажень ( $k = E_{co} \cdot \varepsilon_{cl} / f_{ck}$ ), але і швидкістю

деформування бетону  $\dot{\varepsilon}$ . Отримана залежність дає змогу контролювати весь процес деформування стиснутого бетону в бетонних і залізобетонних елементах і конструкціях за дії тривалих навантажень і прогнозувати рівень його тривалої міцності.

Загалом же вищенаведені результати досліджень відкривають широкі можливості в розробленні універсальної методики розрахунку залізобетонних елементів і конструкцій [25] за дії навантажень будь-якої тривалості.

### Список використаних джерел

1. Graf O. und Brenner E. Versuche mit Betonkörpern, die einer dauernd wirkenden Druckbelastung ausgesetzt waren. *BAUINGENIEUR*. 1937. Heft 19/20. S. 237-270.
2. Shank J. R. Plastic Flow of Concrete at High Overload. *ACI Journal*. 1949. Vol. 20, No. 6. P. 493-498.
3. Sell R. Investigation into the Strength of Concrete Under Sustained Load. *RILEM Bulletin*. 1959. No. 5. P. 1-13.
4. Rüsч H. Versuche zur Bestimmung des Einflusses der Zeit auf Festigkeit und Verformung. *IABSE Kongressbericht*. 1956. No. 5. P. 237-244.
5. Rüsч H. Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete. *ACI Journal*. 1960. Vol. 57, No. 1. P. 1-28. URL: DOI:10.14359/8009.
6. Яшин А. В. Деформации бетона под длительным воздействием высоких напряжений и его длительное сопротивление при сжатии. *Особенности деформаций бетона и железобетона и использование ЭВМ для оценки их влияния на поведение конструкций*. Москва: Стройиздат, 1969. С. 38-76.
7. Awad M. E. and Hilsdorf H. K. Strength and Deformation Characteristics of Plain Concrete Subjected to High Repeated and Sustained Loads. *Structural Research Series*. 1971. No. 372. 266 p. URL: trid.trb.org/view/99204.
8. Stöckl S. Strength of Concrete under Uniaxial Sustained Loading. *SP-34 Concrete for Nuclear Reactors*. 1972. Vol. 1. P. 313-326.
9. Ngab A. S., Slate F. O., Nilson A. H. Microcracking and Time-Dependent Strains in High Strength Concrete. *ACI Journal*. 1981. Vol. 78. P. 262-268. (SCOPUS). URL: trid.trb.org/view/868767.
10. Smadi M. M., Slate F. O. and Nilson A. H. High-, Medium-, and Low-Strength Concretes Subject to Sustained Overloads - Strains, Strengths, and Failure Mechanisms. *ACI Materials Journal*. 1985. Vol. 82, No. 5. P. 657-664. (SCOPUS). URL: concrete.org/publications/details&ID=10376.
11. Han N. Time Dependent Behaviour of High Strength Concrete: PhD Dissertation. Delft University of Technology, 1996. 317 p.
12. Iravani S. and MacGregor J. G. Sustained load strength and short-term strain behavior of high-strength concrete. *ACI Materials Journal*. 1998. Vol. 95, No. 5. P. 636-647. (SCOPUS). URL: trid.trb.org/view/542160.

13. CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Lausanne: Comité Euro-International du Béton, 1991. 437 p.
14. Fib Model Code 2010. Final draft. Fib Bulletin 66. 2012. Vol. 2. 377 p.
15. Петров А. Н. Деформационная модель нелинейной ползучести железобетона и ее приложение к расчету плосконапряженных элементов и систем из них: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01. Москва: НИИЖБ, 2001. 321 с.
16. Krishan A., Rimshin V., Erofeev V., Kurbatov V., Markov S. The Energy Integrity Resistance to the Destruction of the Long-Term Strength Concrete. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 117. P. 211-217. (SCOPUS). URL: doi.org/10.1016/j.proeng.2015.08.143.
17. Tasevski D., Fernández Ruiz M. and Muttoni A. Compressive Strength and Deformation Capacity of Concrete under Sustained Loading and Low Stress Rates. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2018. Vol. 16. P. 396-415. (SCOPUS). URL: doi.org/10.3151/jact.16.396.
18. Empelmann M., Javidmehr S. Evaluation of concrete compression failure under high sustained loads. *Proceedings of the fib Symposium (22.-24.11.2020 in Shanghai, China)*. 2020. P. 827-834.
19. Romashko V. M. and Romashko O. V. Energy resource of reinforced concrete elements and structures for the deformation-force model of their deformation. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 708. 012068. (SCOPUS). URL: doi.org/10.1088/1757-899X/708/1/012068.
20. Romashko V., Romashko-Maistruk O. Strength resource calculation of the reinforced concrete elements according to the energy criterion. *Procedia Structural Integrity*. 2022. Vol. 36. P. 269-276. (SCOPUS). URL: doi.org/10.1016/j.prostr.2022.01.034.
21. Ромашко В. М. Жорсткість та модуль деформацій бетону в деформаційній моделі. *Бетон и железобетон в Украине*. 2007. № 6. С. 2-6.
22. Ромашко В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций. *Міжнародний науковий журнал (International scientific journal)*. 2016. Вип. 3. С. 84-86. URL: nbuv.gov.ua/UJRN/mnj\_2016\_3\_23.
23. Romashko V. and Romashko O. Fundamentals of the General Theory of Resistance of Reinforced Concrete Elements and Structures to Power Influences. *Materials Science Forum*. 2019. Vol. 968. P. 534-540. (SCOPUS). URL: doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.968.534.
24. Ромашко-Майструк О. В., Ромашко В. М. Основні особливості деформування бетону за дії динамічних навантажень. *Зб. наук. праць Укр. Держ ун-ту залізнич. трансп.* 2023. Вип. 205. С. 60-70. URL: doi.org/10.18664/1994-7852.205.2023.288924.
25. Sanjarovskiy R. et al. General theory and foundations for calculating reinforced concrete structures of buildings and structures in modern construction. *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 281. 01041. (SCOPUS). URL: doi.org/10.1051/e3sconf/202128101041.

---

Ромашко-Майструк Олена Василівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Тел.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Ромашко Василь Миколайович, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки, Національний університет водного господарства та природокористування (м. Рівне). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasy1@gmail.com.

Romashko-Maistruk Olena Vasylivna, PhD(Tech.), associate professor at the Department of Industrial, Civil Construction and Engineering Structures National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3353-2268. Tel.: (096) 131-99-17. E-mail: romashkoolena@gmail.com.

Romashko Vasylyl Mykolayovych, D. Sc.(Tech.), associate professor, head of Chair of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Environmental Engineering (Rivne). ORCID: 0000-0003-3448-7489. Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasy1@gmail.com.

Статтю прийнято 09.12.2023 р.



УДК 624.01:691.322

## ОЦІНЮВАННЯ ГРАНУЛОМЕТРИЧНОГО СКЛАДУ ВТОРИННИХ ЗАПОВНЮВАЧІВ, ОТРИМАНИХ ІЗ ВІДХОДІВ БЕТОНУ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, асп. О. С. Зінченко,  
кандидати техн. наук А. В. Никитинський, О. В. Романенко

## PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION ASSESSMENT OF THE RECYCLED AGGREGATES FROM CONCRETE REMAINS

Dr. Sc. (Tech.) L. Trykoz, postgrad. student O. Zinchenko,  
PhD (Tech.) A. Nykutytskyi, PhD (Tech.) O. Romanenko

**Анотація.** У статті наведено результати оцінювання гранулометричного складу вторинних заповнювачів, отриманих із відходів бетону подрібненням залишків залізобетонних шпал. Встановлено, що за гранулометричним складом крупний заповнювач відповідає вимогам для використання у бетонних сумішах. Дрібний заповнювач має модуль крупності 0,9 і за гранулометричним складом не придатний для виготовлення бетонних сумішей. Використання рециркульованих заповнювачів знизить потребу будівельної галузі в природних матеріалах і собівартість виготовлення бетонних конструкцій, а також зменшить площу земель, зайнятих під будівельне сміття.

**Ключові слова:** крупний заповнювач, дрібний заповнювач, гранулометричний склад, крива розсіву, бетон.

**Abstract.** The reuse of the remainders of destroyed concrete structures is becoming more and more urgent problem not only in Ukraine, but also in the whole world. According to the current strategy of secondary use of resources, concrete waste is either crushed into recycled aggregate as a substitute for natural aggregate or crushed into recycled powder as a substitute for cement in mortar and concrete. The reuse of construction waste as secondary construction materials can reduce the need for natural resources for construction and free areas from accumulated construction debris. The purpose of the work is to evaluate the particle size composition of aggregates obtained from recycled concrete of waste reinforced concrete railway sleepers. To achieve the goal, the following tasks were set: to grind of sleeper waste in various ways; to determine the granulometric composition of coarse and fine aggregates; compare the obtained data with the standard requirements for concrete aggregates. Destroyed reinforced concrete railway sleepers were used as material for research. After removing the reinforcement, the sleeper parts were first loaded into a jaw crusher with a fixed distance between the working plates at 20 mm. The obtained material was reloaded into a drum mill and grinded for 30 minutes. After that, the mixture was unloaded on a standard set of sieves to determine the particle size distribution. As a result of an experimental study of crushed waste of reinforced concrete sleepers, the following was established. The granulometric composition of particles larger than 5 mm meet the requirements for coarse aggregates to produce concrete mixtures. Fractions with particle sizes less than 5 mm are very fine with a fineness modulus at 0.9 which does not meet the requirements for fine aggregates to produce concrete mixtures. Further research will be aimed at studying other properties that determine the possibility of using aggregates for reuse in concrete mixes, namely moisture content, average density, compressive strength, etc. Also, the ways for usage of fine

*fractions as fillers will be search for other building materials in order to dispose of crushed concrete waste.*

**Keywords:** *coarse aggregate, fine aggregate, granulometric composition, sieving curve, concrete.*

**Вступ.** Проблема повторного використання залишків зруйнованих бетонних конструкцій стає все більш актуальною не тільки в Україні, але і всьому світі. Відповідно до сучасної стратегії вторинного використання ресурсів бетонні відходи або подрібнюються в перероблений заповнювач як заміна природного заповнювача, або подрібнюються в перероблений порошок як заміна цементу в розчині та бетоні. Переробка будівельних відходів як вторинних будівельних матеріалів може знизити потребу у природних ресурсах для будівництва та звільнити площі від накопиченого будівельного сміття.

Як зазначено в роботі [1], міцність високоміцного бетону, крім інших чинників, буде залежати від міцності та гранулометрії крупного заповнювача. Проте якісні характеристики перероблених заповнювачів дуже сильно відрізняються від природних залежно як від способу подрібнення, так і властивостей початкового подрібнюваного бетону. Виходячи з цього, дослідження властивостей рециклінгових заповнювачів, і перш за все їхнього гранулометричного складу, є актуальним практичним завданням.

**Аналіз попередніх досліджень.** Проблемі повторного використання залишків зруйнованих бетонних конструкцій присвячено багато публікацій вітчизняних і закордонних дослідників. За роботою [2], сукупний світовий попит на бетон у деяких країнах збільшився до 3,8 т на особу, третина бетонних конструкцій з часом перетворюється на відходи, що дає приблизно тону відходів на рік на особу в цілому по усьому світі. Це означає, поперше, що природний заповнювач необхідно замінити безпечнішим для навколишнього середовища матеріалом.

Отримання вторинного щебеню з відходів бетону майже у вісім разів зменшує витрати енергоносіїв, ніж видобування природного щебеню, який використовують українські заводи залізобетонних конструкцій [3]. Мобільні рециклінгові установки, використовувані безпосередньо на місці утворення будівельних відходів, дають змогу економити на закупівлі будівельних матеріалів, а також часі доставлення, оскільки вторинний щебінь для нового будівництва вже знаходиться на будівельному майданчику.

По-друге, стає все більш актуальною проблема перероблення залишків бетонних конструкцій. Після перероблення кількість дрібних частинок, присутніх у рециркульованому заповнювачі, залежить від якості старого бетону, розмір частинок безпосередньо впливає на якість знов виробленого бетону. Крім того, кількість прикріпленого розчину збільшується зі зменшенням розміру частинок, і цей розчин схильний до розшарування, що призводить до зниження міцності на роздавлювання і удар, а також стійкості до стирання бетону на таких заповнювачах порівняно з бетоном на природних заповнювачах [4].

У дослідженні [5] вивчалися фізичні властивості дрібних заповнювачів, а також міцність і вартість бетону, отриманого шляхом часткової заміни піску повторно використаним дрібним заповнювачем і штучним піском. Авторами були проведені випробування на міцність на стиск, і результати показали, що бетон, який містить рециркульовані і штучні заповнювачі як замітник піску, має більшу міцність на стиск, ніж стандартний бетон. Бетон, у якому весь пісок заміняється вказаними заповнювачами, є економічною сумішшю, що дає змогу заощадити до 2,41 % загальної вартості бетону.

Подрібнені залишки бетону житлових будівель як крупні заповнювачі оцінювали з використанням традиційного ситового аналізу, а як дрібні заповнювачі визначали як такі, що пройшли через сито з розмірами отворів 4,75 мм. Серед домішок у рециркульованих дрібних заповнювачах зустрічалися гіпс, глина, деревина, кераміка та біологічні компоненти. Для видалення цих домішок використовували просіювання, ручне збирання або водну флотацію, а також промивання. Дані розсіву в дослідженні [5] свідчать, що гранулометричний склад дрібних заповнювачів знаходиться в межах відповідних стандартів, а крупних заповнювачів виходить за допустимі значення, тобто розмір частинок є більшим, ніж можна використовувати в бетонах класу С-25. Тому для виготовлення зразків було використано лише дрібний заповнювач. Можливість використання крупного заповнювача не було досліджено в цій роботі.

Щоб продемонструвати різноманітність заповнювачів, що походять з різних типів відходів бетонних конструкцій, у роботі [6] приготували різні типи заповнювачів. Було показано, що шляхом подрібнення затверділої цементної пасти можна отримати двофракційну суміш із середніми розмірами 5 і 60 мкм. При подрібненні відходів будівельного розчину найбільшу фракцію складали частинки з розмірами 30 мкм, а після подрібнення бетонних відходів – 20 мкм. Автори не описали докладно режими подрібнення, використане обладнання та час, тому ці дані не можуть бути розповсюджені на всі подрібнені відходи бетонних конструкцій. У дослідженні [7] виконано порівняння гранулометричних складів відходів бетону, отриманих з різних переробних заводів. Було показано, що заповнювачі з одного заводу містили більше дрібних частинок в інтервалі 0,15-0,3 мм, ніж з іншого. Додаткове просіювання відділило дрібну фракцію, яка містить в основному частинки з розмірами від 0 до 0,3 мм, і більш крупну

з розмірами частинок від 1,18 до 9,5 мм. Але в обох випадках рециркульовані заповнювачі були дрібнішими, ніж природний пісок, а отже, застосування таких заповнювачів для виготовлення бетону потребує подальших досліджень.

Як свідчить виконаний огляд попередніх досліджень, на гранулометричний склад подрібнених відходів зруйнованих бетонних конструкцій впливає дуже багато чинників, серед яких міцність первинного бетону, спосіб перероблення і подрібнення тощо. В автодорожній галузі вже давно використовується матеріал зношених асфальтобетонних шарів для відновлення асфальтобетонного покриття. Актуальність впровадження технологій перероблення та повторного застосування цементобетону в дорожній галузі України підтверджується наявністю низки нормативних документів, які врегульовують це питання [8]. У цивільному і транспортному будівництві відповідні нормативні документи відсутні, тому дослідження властивостей заповнювачів із переробленого бетону може стати підґрунтям для створення бази даних, після узагальнення яких можливе розроблення технічних умов і регламентів.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є оцінювання гранулометричного складу заповнювачів, отриманих із переробленого бетону відходів залізобетонних залізничних шпал. Для досягнення мети було поставлено такі завдання: здійснити подрібнення відходів шпал різними способами; визначити гранулометричний склад крупного і дрібного заповнювачів; порівняти отримані дані зі стандартними вимогами до заповнювачів бетону.

**Матеріали і методи дослідження.** Як матеріал для досліджень використовувалися зруйновані залізобетонні залізничні шпали, частини яких є суцільними агрегатами з декількох зерен щебеню, з'єднаними цементно-піщаним розчином із залишків старого бетону. Після видалення

арматури частини шпал спочатку завантажували в шокову дробарку з установленою відстанню між робочими поверхнями 20 мм. Отриманий матеріал перевантажували в барабанний млин і подрібнювали протягом 30 хв. Після цього суміш вивантажували на стандартний набір сит для визначення гранулометричного складу. Визначення зернового складу крупного заповнювача проводилося за ДСТУ Б В.2.7-71 [9], зернового складу дрібного заповнювача – ДСТУ Б В.2.7-232 [10]. Встановлення відповідності властивостей заповнювачів вимогам для застосування в бетонних сумішах здійснювалося за ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [11].

**Основна частина досліджень.** Для визначення гранулометричного складу подрібненої суміші було визначено залишки на ситах і побудовано криву розсіву за ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [11]. Часткові та повні залишки на ситах наведено в таблиці, а гранулометрична крива – на рис. 1.

За ДСТУ-Н Б В.2.7-299 [11], якщо лінія розсіву сумішей розташована нижче кривої *A*, то така суміш заповнювачів

вважається недоцільною для використання, оскільки вона занадто перенасичена частинками крупного розміру і дуже важко піддається обробці. До того ж така суміш має схильність до розшарування. Якщо лінія розсіву проходить між кривими *A* та *B*, то така суміш заповнювачів вважається оптимальною. Якщо лінія розсіву проходить у площині між кривими *B* та *C*, то вважається, що така суміш заповнювачів перенасичена піском. Вона має підвищену водопотребу і, як наслідок, потребує більшої кількості цементу або пластифікуючої добавки. Як видно з рис. 1, експериментальна крива розсіву (помаранчева лінія) лише частково відповідає вимогам до гранулометричного складу заповнювачів і має суттєву відмінність від кривих розсіву для поліфракційних кондиційних заповнювачів, наведених у роботі [1], для гранітного щебеню марки за міцністю 1200, фракцій 2-5 мм, 5-10 мм і 10-20 мм.

Для більш точного оцінювання властивостей було проведено окремий розсів крупного і дрібного заповнювачів (рис. 2, 3).

Таблиця

Часткові та повні залишки на ситах суміші заповнювачів

Розміри отворів контрольних сит, мм	Часткові залишки на ситах, %	Повні залишки на ситах, %
пройшло через сито 0,16	28,37	28,37
0,16	11,15	39,52
0,315	1,78	41,30
0,63	0,32	41,63
1,25	0,76	42,39
2,5	1,42	43,81
5	5,50	49,31
10	18,97	68,28
20	31,72	100,00

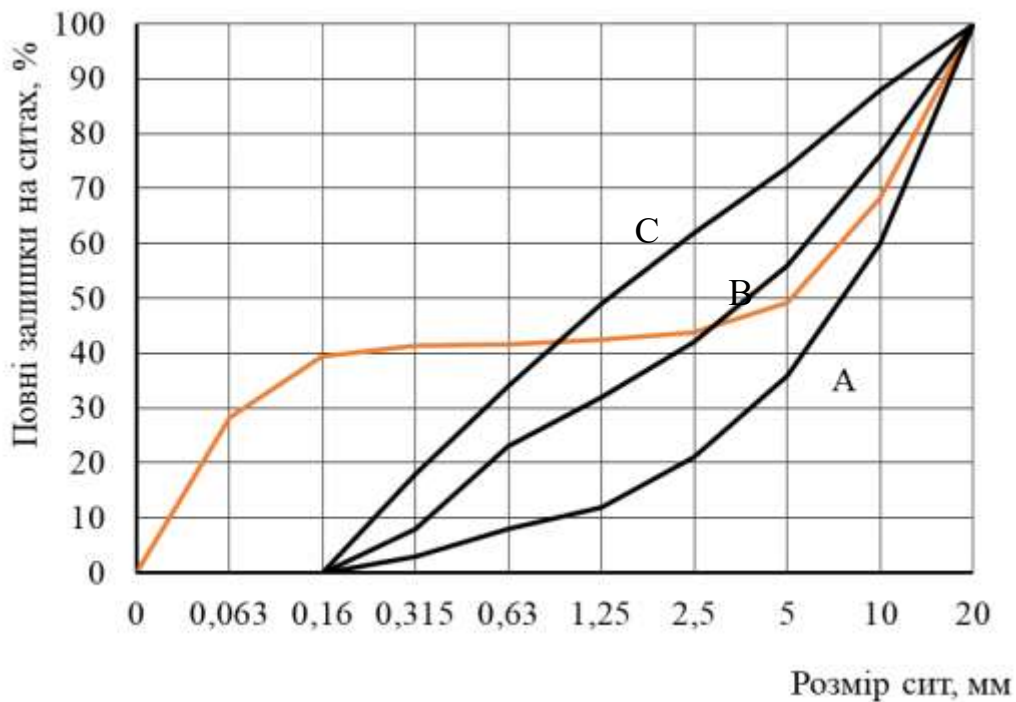


Рис. 1. Крива розсіву суміші заповнювачів

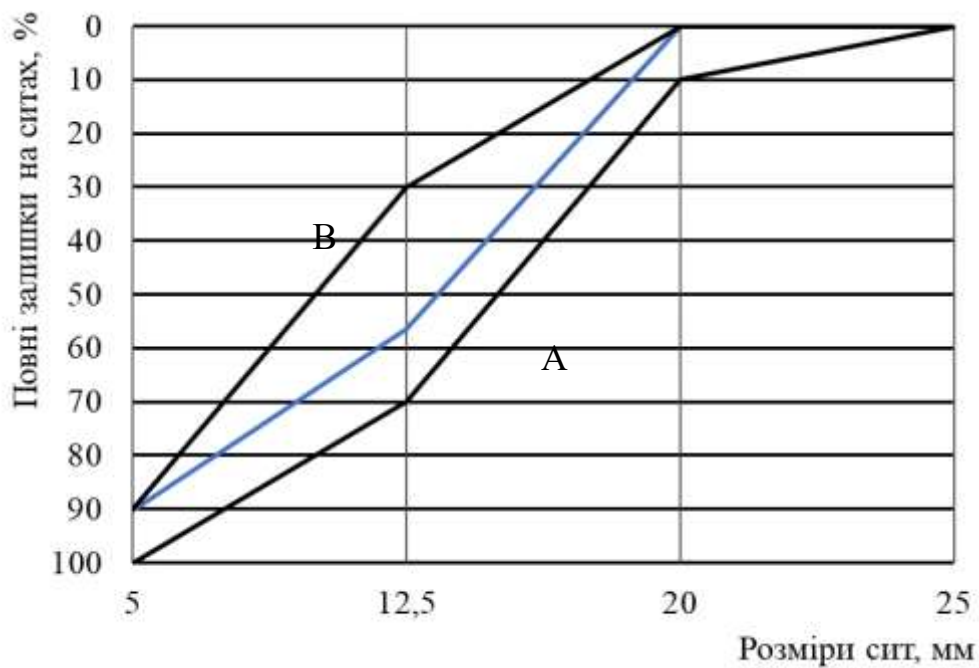


Рис. 2. Крива розсіву крупного заповнювача

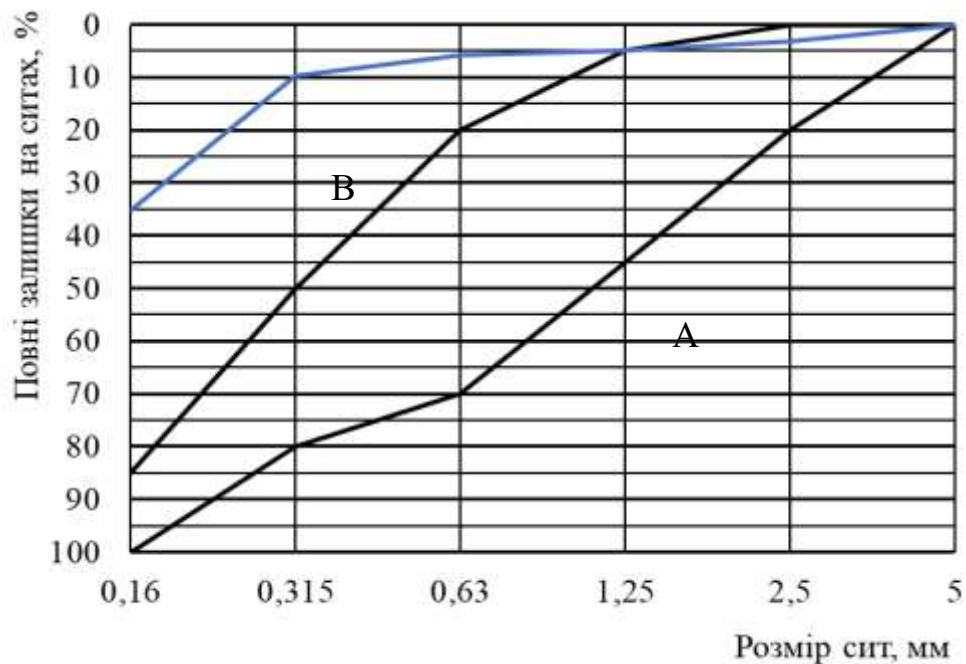


Рис. 3. Крива розсіву дрібного заповнювача

Якщо лінія розсіву проходить між кривими *A* та *B* (рис. 2 і 3), то такий заповнювач вважається придатним для виготовлення бетону, за роботами [12, 13]. Крива розсіву крупного заповнювача (блакитна лінія на рис. 2) розташована між кривими *A* і *B*, отже, за гранулометричним складом крупний заповнювач придатний для виготовлення бетонної суміші. Крива розсіву дрібного заповнювача (блакитна лінія на рис. 3) розташована вище кривої *A*, тобто за гранулометричним складом дрібний заповнювач не придатний для виготовлення бетонної суміші. Розрахований модуль крупності цього піску становить 0,9, тож такий заповнювач, за класифікацією [14], належить до групи тонких. Відповідно до роботи [11] як дрібний заповнювач для бетонів можуть використовуватись піски з модулем крупності від 1,0 до 4,0. Отже, за цим параметром дрібний заповнювач із переробленого бетону не може бути застосований у бетонних сумішах. Вміст у піску зерен, що проходять через сито 0,16 мм, перевищує за масою 15 %, що не відповідає вимогам ДСТУ [11].

**Висновки.** У результаті експериментального дослідження подрібнених відходів залізобетонних шпал встановлено таке. Гранулометричний склад частинок розмірами більше 5 мм відповідає вимогам, які висуваються до крупних заповнювачів для виготовлення бетонних сумішей. Фракції з розмірами частинок менше 5 мм є дуже дрібними з модулем крупності 0,9, що не відповідає вимогам, які висуваються до дрібних заповнювачів для виготовлення бетонних сумішей. Оцінювання заповнювачів, отриманих із подрібнених відходів залізничних шпал було проведено лише за одним параметром – гранулометричним складом. Подальші дослідження будуть спрямовані на встановлення інших властивостей, які визначають можливість застосування заповнювачів для повторного використання в бетонних сумішах, а саме вологості, середньої щільності, міцності при роздавлюванні тощо. Також буде здійснено пошук шляхів використання дрібних фракцій як заповнювачів інших будівельних матеріалів з метою утилізації відходів подрібненого бетону.

Список використаних джерел

1. Троян В. В., Попруга П. В., Кіндрась Б. П. Високоміцні бетони на основі високорухомих товарних бетонних сумішей. *Будівельні матеріали та вироби*. 2014. № 2. С. 12-13.
2. Makul N. Recycled Aggregate Concrete. Technology and Properties. London : Taylor & Francis Group, 2023. P. 1-15.
3. Автомонова В. О., Власенко В. В., Зайцева К. О., Кривільова С. П. Рециклінг відходів виробництва та брухту бетонних конструкцій як центральна ланка концепції екологізації заводів ЗБК. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. Харків: НТУ «ХПІ», 2017. № 48 (1269). С. 16-23.
4. Anike E. E., Saidani M., Ganjian E., Tyrer M., Olubanwo A. O. The potency of recycled aggregate in new concrete: a review. *Construction Innovation*. 2019. Vol. 19. No. 4. P. 594-613. URL: <https://doi.org/10.1108/CI-07-2018-0056>.
5. Molla F. A. Concrete with Recycled Fine Aggregate (RFA) and Manufactured Sand (MS): Compressive Strength and Cost. Preprint Research Square. 2022. URL: <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1407923/v1>.
6. Ma Zh., Zhang Zh., Hu R., Liu X., Shen J., Wang Ch. Chloride resistance and improvement of fully recycled cementitious materials with both recycled aggregate and recycled powder. *Journal of Sustainable Cement-Based Materials*. 2023. P. 1-19 URL: <https://doi.org/10.1080/21650373.2023.2252458>.
7. Katz A., Kulisch D. Efficiency of Using Recycled Fine Aggregate for a New Concrete. *Sustainable Built Environment (SBE). Regional Conference Zurich*. June 15-17. 2016. P. 404-407. URL: [http://dx.doi.org/10.3218/3774-6\\_65](http://dx.doi.org/10.3218/3774-6_65).
8. Терещенко Т. А. Можливості застосування регенованих дисперсних матеріалів у неукріплених шарах основи дорожнього одягу. *Дороги і мости*. 2017. Вип. 17. С. 73-80. URL: <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2017.17.005>.
9. ДСТУ Б В.2.7-71-98. Щебінь і гравій із щільних гірських порід і відходів промислового виробництва для будівельних робіт. Методи фізико-механічних випробувань. Київ: Держкомбуд України, 1999. 47 с.
10. ДСТУ Б В.2.7-232:2010. Будівельні матеріали. Пісок для будівельних робіт. Методи випробувань. Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. 44 с.
11. ДСТУ-Н Б В.2.7-299:2013. Настанова щодо визначення складу важкого бетону. Київ: Мінрегіонбуд України, 2014. 86 с.
12. ДСТУ Б В.2.7-75-98. Щебінь і гравій щільні природні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держкомбуд України, 1999. 16 с.
13. ДСТУ Б В.2.7-32-95. Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 13 с.
14. ДСТУ Б В.2.7-29-96. Будівельні матеріали. Дрібні заповнювачі природні, із відходів промисловості, штучні для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій та робіт. Класифікація. Київ: Держкоммістобудування України, 1996. 19 с.

---

Трикоз Людмила Вікторівна, доктор технічних наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: [lvtrikoz@ukr.net](mailto:lvtrikoz@ukr.net). ORCID 0000-0002-8531-7546.  
Зінченко Олексій Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-68. E-mail: [potatosrumba@gmail.com](mailto:potatosrumba@gmail.com). ORCID 0009-0000-3858-8258.

---

Никитинський Андрій Володимирович, кандидат технічних наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд, Український державний університет залізничного транспорту. Тел.: (057)730-10-63. E-mail: NykytynskyiAV@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-4923-8568.

Романенко Олександр Валерійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: Romanenko@kart.edu.ua. ORCID 0000-0002-9203-6056.

Trykoz Liudmyla, DSc, professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net\_ORCID 0000-0002-8531-7546.

Zinchenko Oleksii, postgraduate student, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-68. E-mail: potatosrumba@gmail.com. ORCID 0009-0000-3858-8258.

Nykytynskyi Andrii, PhD, associate professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-10-63. E-mail: NykytynskyiAV@kart.edu.ua.

ORCID 0000-0002-4923-8568.

Romanenko Oleksandr, PhD, associate professor, Building Materials, Constructions and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-63. E-mail: Romanenko@kart.edu.ua.

ORCID 0000-0002-9203-6056.

Статтю прийнято 10.12.2023 р.



**ГЕОДЕЗІЯ ТА ЗЕМЛЕУСТРІЙ (193)**

---

УДК 336.221.4: 061.1

**РОЗВИТОК АДМІНІСТРАТИВНО-ТЕРИТОРІАЛЬНОГО УСТРОЮ УКРАЇНИ  
ЯК ВІДПОВІДЬ НА МІЛІТАРНІ ВИКЛИКИ**

Д-р екон. наук Г. І. Шарій, д-р техн. наук Є. Б. Угненко, асист. Н. І. Сорочук,  
кандидати техн. наук Є. М. Коростельов, О. М. Ужвієва, А. О. Шевченко

**DEVELOPMENT OF UKRAINE'S ADMINISTRATIVE AND TERRITORIAL SYSTEM  
IS A RESPONSE TO MILITARY CHALLENGES**

Dr. Sc. (Econ.) G. Shariy, Dr. Sc. (Tech.) Ye. Ugnenko, Assistant N. Sorochuk,  
PhD (Tech.) Ye. Korostelov, PhD (Tech.) O. Uzhviieva, PhD (Tech.) A. Shevchenko

***Анотація.** У роботі розглянуто необхідність удосконалення і подальшого розвитку адміністративно-територіального устрою України в умовах мілітарних викликів. Проведено екскурс в історію адміністративно-територіальних реформ на землях України та проаналізовано закордонний досвід. Виявлено хиби в нинішньому стані адміністративно-територіального устрою і перераховано недоліки, які необхідно виправити, у системі збору земельних платежів і соціально-справедливого перерозподілі земельних ресурсів. Запропоновано новітній «Краєвий устрій» України та визначено адміністративно-регуляторні кроки для раціоналізації адміністративно-територіальних базових одиниць – громад і країв. Визначено шляхи підвищення стійкості територій у багатьох аспектах: економічному, соціальному, демографічному і воєнному.*

***Ключові слова:** адміністративно-територіальний устрій, земельний розвиток, податок, мілітарна стійкість, соціальна справедливість, краєвий устрій.*

***Abstract.** The problems associated with incompetent land and resource management, inefficient administrative and land taxation systems are especially acute in the face of geopolitical threats and military challenges. The shadow land economy, concealed use of almost half of the shares, socially unfair re-distribution of land resources, and ability to buy hundreds of houses and grounds by one person, and land tax evasion are undermining the communities' budgets as well as the foundations of social and economic development in rural areas. The paper highlights the need to improve and further develop the administrative and territorial system in Ukraine under the conditions of military challenges. It also presents a journey into the history of administrative and territorial reforms implemented on Ukrainian lands and gives an analysis of similar experience in other countries. The administrative and territorial reforms in European countries managed to combat separatist tendencies. In Europe, the gentrification and urbanization processes preserve the settlement system and sustain the settlement network. However, in Ukraine, even during the war, city authorities continue to support multi-storey residential development projects for city centres, thus undermining the ability of the cities to respond to military threats. The study reveals shortcomings of the current administrative and territorial system and identifies negative patterns in the land taxation system and those associated with socially just re-distribution of land resources. It also proposes a new regional regulation system for Ukraine and presents managerial and*

*regulatory strategies to rationalize main territorial units, namely communities and areas. The ways to increase the sustainability of territories economically, socially, demographically and militarily, are also described. The administrative and territorial reform can only be successful in a socially and economically just society regarding the issues of land recourse re-distribution, taxation system, and infrastructure development.*

**Keywords:** *administrative and territorial system, land development, taxation system, military stability, social justice, regional structure.*

**Вступ.** Проблеми неефективного управління земельно-ресурсним потенціалом, недосконалого адміністративно-територіального устрою та земельного оподаткування гостро проявляються в умовах геополітичних загроз і мілітарних викликів.

Тінізація земельних відносин, використання майже половини паїв у тіньовому форматі, соціально несправедливий перерозподіл земельних ресурсів, можливість скуповувати в одні руки сотні садіб і ухиляння від сплати земельного податку підривають бюджети громад і основи соціально-економічного розвитку сільських територій [1].

Країни Європи, провівши адміністративно-територіальні реформи, викоринили сепаратизм.

У Європі процеси джентрифікації і рурбанізації забезпечують збереження системи розселення і стійкість поселенської мережі. В Україні, навіть під час війни, продовжується багатоповерхова житлова забудова центрів міст, підриваючи і так невисоку стійкість міст до мілітарних загроз.

Війна вимагає перегляду в Україні і Генеральної схеми планування території України, і адміністративно-територіального устрою і зміни внутрішньої економічної політики просторового розвитку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Історія адміністративно-територіального устрою країн світу та України сягає сивої давнини і формує історичний матеріал, який дає змогу пов'язати адміністративно-територіальний устрій з економічним, політичним і соціальним рівнем розвитку та правильно

відреагувати на геополітичні актуалітети і мілітарні виклики сучасності.

Історично країни світу впроваджували адміністративно-територіальні моделі і державотворчі каркаси, які виявляли стійкість до зовнішніх військових агресій і відповідали планам і завданням соціально-економічного прогресивного розвитку та державотворення.

В умовах війни і воєнних агресій країни запроваджували військово-адміністративний устрій (воєводства, генерал-губернаторства, полковий устрій), виділяючи воєнізовані поселення і території козачих військ, землі Війська Запорозького, полкові містечка, групи лінійних оборонних поселень. З другої половини XVII століття, в особливий період формування української державності, територія центральної України одержала особливий адміністративно-територіальний устрій з поділом території на полкові і сотенні землі. Відзначимо унікальність об'єднаної політики Богдана Хмельницького, коли полки мали сотні і на правому, і на лівому берегах Дніпра (Кременчуцький полк).

Адміністративно-територіальні реформи були націлені на військові цілі і розселення цивільного населення в Польсько-Литовській державі з системою фортець-поселень, будівництвом транспортно-комунікаційних ліній, заселенням людей до фортець і під захист замків. Зазначене підвищувало оборонну стійкість держави проти зовнішніх агресорів, захищало і територію, і населення і формувало необхідні ресурси для швидкої мобілізації: людські, продовольчі, військові. Центри

адмінотодиноци не виносилися до кордонів, а, навпаки, переносилися вглиб територій під захист оборонних ліній і військових поселень.

Транспортні коридори будувалися так, щоб забезпечувати перш за все ефективні та раціональні внутрішні комунікації і максимально підтримувати військово-торговельні зв'язки тільки з дружніми сусідніми державами. У Швейцарії та Німеччині внутрішньому транспортному сполученню приділялася більша увага, ніж сполученню з зовнішнім світом. У Римській імперії для підтримки внутрішніх комунікацій було побудовано 88 тис. км доріг.

Але адміністративно-територіальні реформи на землях України здебільшого виражали економічні і політичні інтереси імперій, а не спряли утвердженню української державності. Поділивши територію України на губернії та повіти (з волостями для управління державними і тимчасово зобов'язаними селянами), імперська унітарна система вимагала значної подрібненості адміністративних одиниць. У 1881 році на території Полтавської губернії, що займала площу 5 млн га, існувало 15 повітів і 450 волостей, наприкінці 1917 року губернія мала 15 повітів і 245 волостей з сільським населенням 550 тис. осіб [2].

Але історія розвитку України не знала такої подрібненості адміністративно-територіальних одиниць, яка була за радянських часів, коли на території Полтавської області, що займала площу 2,8 млн га, у 1920-х роках було утворено 44 райони і майже тисячу сільських рад [2]. Дія унітарної адміністративно-командної системи управління ефективна тоді, коли є можливість «ручного управління» кожним елементом і структурним підрозділом системи.

Аналіз розвитку поселенської мережі в Полтавській області як за часів Радянського Союзу, так і в Україні за останні 30 років дають чітку картину

соціально-економічного банкрутства державної політики розвитку та реконструкції сільських поселень. З карти України зникли та продовжують зникати і зніматися з обліку тисячі населених пунктів, частина з них приєдналася до міст, сіл і селищ.

Відбулася трансформація адміністративно-територіального поділу. У нинішніх межах Полтавської області кількість сільських рад протягом 1946-2002 років була скорочена з 802 до 467, кількість районів — з 36 до 25, а в останні п'ять років проведена нині адміністративно-територіальна реформа сформувала в області чотири райони і 60 громад.

Ігнорування еколого-ландшафтних і селотворчих складових призвело до того, що за радянський період тільки в Полтавській області було ліквідовано більше двох тисяч сільських поселень.

В Україні понад 700 тис. га земель були затоплені водоакумулюючими водосховищами Дніпра, що стало тоді однією з умов передання Україні Криму. Обводнення Криму дорого обійшлося Україні, крім затоплених понизь Дніпра, розселенням сотень сіл, селищ і міст, переселенням у степ сотень тисяч громадян, ще й переданням сусіднім державам більше мільйона гектарів земель України.

Влада не зважала, що кожне поселення, навіть найменше, маючи свій культурно-історичний родовід, посідає сформовану століттями просторову територіально-економічну нішу краю та забезпечує ефективно і найбільш раціональне використання кожної земельної ділянки, кожного пасовища, річечки, водойми, тобто всього спектра природних ресурсів. Роботи О. Чаянова довели економічну ефективність наближення садиби селянина до основного засобу виробництва – землі [3].

Якщо ми подивимося на початок ХХІ століття, то найуспішнішими в будь-

якому сенсі виявилися невеликі країни світу – звичайно береться до уваги універсальний соціально-економічний показник ВВП на душу населення. За ним нині на перших місцях не величезні США, Китай, Індія тощо, а маленькі держави Швейцарія, Данія, Люксембург. Наука відкидає наявність безпричинних явищ. Причинно-наслідковий аналіз указує на об'єктивний характер явища. Невеликими за площею територіями можна ефективніше, раціональніше управляти.

Для країн Європи територіальні виклики і просторові загрози набули актуальності ще в 1950-1970-ті роки, що спонукало провести муніципальні реформи, внаслідок яких зменшилася кількість низових територіальних громад. Так, у результаті реформи 1974 року в Данії кількість комун скоротилася з 1388 до 275. У колишній Німеччині в процесі реформи 1967-1968 років кількість общин зменшилася з 24278 до 8514, в Англії та Уельсі у 1972 році кількість округів скоротилася з 1383 до 402, у Швеції у 1960-1970-х роках кількість муніципалітетів скоротилася з 1037 до 278 [3].

Щоб ліквідувати сепаратистські настрої і впровадити перспективну реформу розвитку, де Голль у Франції в повоєнний період провів ефективну та унікальну адміністративно-територіальну реформу, утворивши 22 регіони, але обравши шлях консолідації країни [4].

Недосконалий адміністративно-територіальний устрій України сприяв сепаратистським настроям, процесам регіоналізації, підривав основи державотворення.

Ще в 1995 році вченими України пропонувалося провести реформу адміністративно-територіального устрою та утворити в Криму дійсно самовладну татарську автономію, а степовий Крим приєднати до Таврійського краю, землі Луганщини і Донеччини – до Слобожанщини і Подніпров'я. Пропонувалося створити на Полтавщині

три краї: Полтавський, Кременчуцький і Лубенський за принципом центрів економічного тяжіння, доєднавши до Кременчуцького краю Олександрію, Павлиш і Світловодськ із Кіровоградщини, які економічно і соціально тяжіють до Кременчука, а до Лубен – Золотоношу і Чорнобай із Черкащини [6].

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є необхідність удосконалення і подальшого розвитку адміністративно-територіального устрою України в умовах мілітарних викликів.

**Основна частина дослідження.** Частково реалізована адміністративно-територіальна реформа в Україні призвела до утворення малодієвих районів, продовжила нерівномірність і полярність в розмірах громад за сумнівної економічної самодостатності.

У старій структурі розміри сільських рад складали від 5 до 40 тис. га, за населенням від 300 люд до 15 тис. люд. І нині ситуація не поліпшилася – «добровільність» сформувала на Полтавщині громади площею від 1097 до 88 км<sup>2</sup> з населенням від 3009647 до 2947 громадян [5].

Просторова конфігурація громад вказує на відсутність у багатьох випадках раціональності.

Користувачі крупних сільськогосподарських земельних масивів і добувних галузей стимулювали формування громад під власний економічний інтерес, де мають контрольний пакет голосів у раді громади і можливість доступу до природних ресурсів. Рішеннями чинних громад ігноруються інтереси старостатів, порушуючи соціально справедливий розподіл земель.

Проблеми сформувалися і на економічному рівні, коли різні громади мають дохідність бюджетів, які розрізняються більш ніж у 50 разів і в десятки разів на душу населення.

Теперішній адміністративно-територіальний устрій мало стимулює

органи місцевого самоврядування, продовжує стримувати розвиток, породжує численні колізії, уповільнює темпи проведення економічної реформи та її складових.

Відсутність чітких критеріїв класифікації населених пунктів також є несприятливим чинником. Наприклад, Одеса з населенням понад 1 млн осіб і Теплодар з населенням близько 10 тис. осіб належать до однієї категорії міст обласного значення.

В умовах війни ми маємо вагомі аргументи на користь адміністративно-територіального реформатування і вирішення конкретних проблем, що об'єктивно існують. Проведена за добровільним принципом адміністративно-територіальна реформа сьогодні вилася в адміністративно-політичну суспільну пастку, яка особливо гостро проявилася у східних регіонах країни.

Причиною кризових явищ є неврахування динамічного розвитку соціально-економічного стану територій, зміни центрів економічного тяжіння і логістичних зв'язків та ігнорування значущості містоутворюючих чинників. У сільській місцевості в результаті помилкового курсу аграрної реформи на пріоритет приватизації та парцеляції земель у половині поселень ліквідовано виробничо-аграрну структуру, крім самозайнятості населення в особистих господарствах.

Загалом на сьогодні потребують термінового вирішення такі проблеми у сфері адміністративно-територіального устрою України:

- законодавча неврегульованість правового статусу адміністративно-територіальних одиниць, таких як селище міського типу, селищна та міська рада;

- недосконалість класифікації міст, відсутність чітких критеріїв формування районів і їхнього фінансування та районів у містах, а також віднесення населених пунктів до категорії сіл, селищ і міст;

- відсутність з винесенням у натуру меж адміністративних одиниць і поселень і визначення меж без урахування економічних чинників і перспектив розвитку населених пунктів;

- переформатування під дією мілітарних чинників економічних і соціально-економічних зв'язків, демографічних чинників розвитку, коли змінилися вектори економічного і соціального тяжіння поселень від одних центрів до інших;

- законодавча невизначеність юрисдикції органів місцевого самоврядування особливо районних і обласних рад, безсистемність територіальної організації органів центральної виконавчої влади, їхня повна автономність і некоординованість з боку органів місцевого самоврядування;

- надмірна унітарна централізація виконавчої влади, в основі більшості структур якої лежала сформована інституційно корупційна вертикаль і призначення посадовців без погодження з місцевим самоврядуванням, що і викликає протистояння і неправильну співпрацю на місцях.

Нами запропоновано систему територіального управління — столиця, край, громада. Щоб використати історичні українські традиції, запропоновано назвати регіони краями, ліквідувати області і райони, утворивши не більше 60 країв [6].

Існування Автономної Республіки Крим цілком урахувало політико-територіальний устрій України. Але мета адміністративно-територіальної реформи полягає в демонополізації та децентралізації системи державного управління шляхом розширення повноважень органів місцевого самоврядування. Під час адміністративної реформи в Україні мала б бути створена чинна модель ефективного місцевого самоврядування, підкріплена відповідним самофінансуванням за поєднанням зусиль і

тісної співпраці з центральними органами виконавчої влади.

Успіх адміністративно-територіальної реформи визначатиметься економічною самодостатністю громад, наявністю соціальної інфраструктури та місто- і селоутворюючих підприємств і привабливістю для рурбанізації та ліквідації демографічної депресивності сільських територій.

Економічна самодостатність громад і країв має опиратися на детінізовану, виведену з економічного підпілля, економіку, цивілізовану справедливую систему оподаткування та соціально справедливий розподіл ресурсів, особливо землі. Під час війни земельні справедливі податки і розподіл земельного ресурсу потребують:

- націоналізації земельних ділянок, які належать юридичним і фізичним особам країн-агресорів і власникам, які стали на бік ворога, слугують ворожому режиму або відмовилися захищати територіальну цілісність України і незаконно емігрували;

- втрати права приватизації земель України незаконними мігрантами призовного віку за будь-яких умов;

- розповсюдження безоплатної приватизації виключно на учасників бойових дій і членів їхніх родин;

- виведення земельних податків на рівень податків європейських країн і цілеспрямованого направлення на відновлення земель і поселенської мережі, інфраструктури і рекультивації земель.

У країнах світу земельний податок ув'язують із містобудівною і еколого-ландшафтною цінністю земель, а не кількістю жителів за реєстрацією в поселенні (найдешевша земля для цілей оподаткування в Україні – Київщина, тому що зареєстровано в приміських поселеннях по декілька жителів).

Низькі земельні податки і платежі сплачують і сільгосптоваровиробники від 125 до 250 грн за 1 га на рік, що на порядок нижче європейського рівня [8].

Проблему формує постійне користування державними і комунальними землями як рудимент радянської епохи, коли ним користуються приватизовані і перепрофільовані підприємства та уникають справедливої плати за землю.

У землях постійного користування крупних землекористувачів виявлено тисячі сторонніх землекористувачів, які взагалі використовують землю безоплатно (у тіні).

Дрібні сільгосптоваровиробники переводять використання паїв у тінювий формат, стимулюючи власників премією-хабарем 5-10 тис. грн і за 1 га, відірвавши пай у крупного виробника, обробляти землю і не декларувати використання.

Сучасне економічне підпілля не дає можливості формувати самодостатній бюджет громади і зводить нанівець результати реформи.

Податки сільських товаровиробників унікальні за нормами, а зміни норми постійно лобіюються, що позначилося, наприклад, на птахівництві, коли ввели обов'язковий перехід на загальний податок для виробників продукції птахівництва, незалежно від об'ємів, безумовно, в угоду монополістів птахопрому. У результаті припинена робота тисяч птахоферм у сільгоспвиробників і ціни на яйця курей сягнули 70 грн за 10 шт., а безробіття на селі тільки зросло.

Рівень місцевого самоврядування «Край» – система рівних між собою самодостатніх структур з головними завданнями самоврядних органів краю формування стратегії розвитку території, реалізації загальних програм (щодо будівництва і підтримання шляхів, інфраструктури, забезпечення екологічного каркасу тощо). Проект територіального устрою «край» України не має встановлювати поділ міст на міста районного, обласного та центрального значення.

Абсурдність добровільності проведеної реформи очевидна і однозначна,

тому затверджувати межі новостворених громад має Кабінет Міністрів України, а межі міст і країв – Верховна Рада України. Адміністративно-територіальна реформа має спиратися на унітарність як головний державний інтерес. Створення самодостатніх країв посилюватиме єдність країни в цілому, консолідуючи територію України. Зрівнявши міста у статусі, піднявши статус міст центрів країв і їхнє політичне значення, крайовий поділ більш конкретно відобразить культурно-історичний розвиток територій, дасть поштовх до економічного розвитку. Край поділятиметься на громади (вони можуть мати особливі назви), це має вирішити і врегулювати чинне законодавство та крайове самоврядування. Нині в Полтавській області сформовано 11 громад, у яких більше 50 поселень, а де і більше – 80 поселень.

Ці громади скоріше за все є об'єднанням громад, а якість соціальних послуг і життя в багатьох поселеннях суттєво погіршилася.

Рівність країв відносно столиці сформує і поновить соціальну, економічну і навіть історичну справедливість. Війна і мілітарні виклики поставили ряд обласних центрів в умови прифронтових і навіть окупованих міст, і деякі з них не можуть виконувати роль адміністративного центру області.

Нині наближені до воєнних дій обласні центри Херсон, Суми і Чернігів мало впливають на вирішення регіональних проблем.

Для багатьох міст України, таких як Біла Церква, Кременчук, Лубни, Дрогобич, Умань, Мелітополь, Переяслав, Ромни, Прилуки — посередник у статусі обласного центру давно виступає стримуючим чинником розвитку. Особливо кризові явища видно на прикладі конкретних областей. На Полтавщині ще в 30-х роках минулого століття м. Лубни за населенням було як Полтава і розглядалося як потенційний обласний центр. На сьогодні в

Лубнах проживає населення в шість разів менше, ніж у Полтаві, високий рівень безробіття, більшість підприємств не працює, а за останні 20 років населення Лубен скоротилось із 75 до 50 тис. жителів.

Слід зазначити, що в регіонах сучасні центри економічного тяжіння визначені і сформовані.

Ураховуючи теперішні умови регіональної економіки, економічної і соціальної географії, територіальної організації суспільства (на прикладі Полтавської області), пропонуємо як центри країв на території області визначити м. Полтаву, м. Лубни та м. Кременчук. Тобто замість існуючих чотирьох районів організувати три краї, яким надати відповідний статус.

В Україні, не чекаючи на реформи, відбувається урбанізація, а не рурбанізація, як у Європі. На Полтавщині сьогодні маємо 35 сіл з чисельністю менше п'яти жителів, близько 160 сіл з населенням менше 50 жителів. Половина сіл у структурі демографічних показників не мають дітей дошкільного віку, а смертність у сільській місцевості випереджає народжуваність у десятки разів; у селах області навіть попри тимчасове розселення нині тисячі покинутих садиб. У половині сіл Полтавщини відсутні підприємства- правонаступники колишніх колективних господарств, зруйновані майнові комплекси, занедбано соціально-культурну інфраструктуру, панує безробіття, а земельні ділянки (паї) селян перебувають в оренді великих сільськогосподарських товаровиробників.

Створення виробничої містоутворюючої і селоутворюючої структури в кожному поселенні виправить ситуацію там, де сьогодні кризовий соціальний і демографічний стан.

Дух і сила країни живе в найвіддаленішому селі, а якщо в половині сіл України не народжувались останні 10-15 років діти, то демографічна ситуація в половині громад України депресивна через

відсутність демографічних перспектив і селоутворюючих підприємств.

Агрохолдинги разом із державними структурами ліквідували більшість робочих місць на сільських територіях і сконцентрували органи управління і адміністрування в містах, що ще більше погіршило демографічні показники на селі. Указане також підриває стійкість територій і країни в цілому.

Але Україну за будь-яких сценаріїв чекає відтворення західних моделей розвитку поселенської мережі, включаючи рурбанізацію і джентрифікацію.

Джентрифікацію зумовлюють чинники взаємодії ринку землі та житла, де утворився «розрив у ренти». Комерціалізація історичних центрів міст України збільшує кількість ренти, але погіршує соціально-економічні умови. В Україні, на відміну від Європи, лібералізація міського простору, як безсистемна хаотична точкова забудова історичних центрів міст на прикладі Києва, не покращує міське середовище, а формує нові проблеми, суттєво знижуючи містобудівні цінності і стійкість територій.

У Європі в останні десятиліття все більше набуває темпів рурбанізація (rural – сільський) як поширення міських форм на сільську місцевість і розселення жителів міст на сільські території. У європейських країнах частка сільського населення постійно зростає за рахунок розселення міст і джентрифікації.

Джентрифікація – соціопросторові зміни і трансформація міського середовища (gentry – еліта) за рахунок розселення міських еліт у приміській території (підтримується політикою держав Європи і США) через проведення субурбанізації і сприяння розселенню з центрів у приміській території і сільську місцевість [8].

Але зараз, навпаки, багата молодь у Європі відновлює історичні центри і відбудовує елітне житло, відновлюючи історичну забудову, історичні райони і архітектурні ансамблі.

Джентрифікація необхідна Україні, як і рурбанізація, це підвищить стійкість України і геополітичну, і мілітарну. Тільки розселення частини населення з міст центрів у сільську місцевість забезпечить збереження країни від будь-яких мілітарних ризиків, загроз і агресій.

Містоутворюючим підприємствам у громадах необхідно дати юридичну самостійність і стимулювати містоутворюючі функції, адже, наприклад, у нафтогазовому комплексі юридичних осіб не залишилося не тільки в районних, а й обласних центрах, вони зареєстровані виключно в столиці.

Центральні органи влади вимивають територіальні адміністративні структури і переводить бюджетотворення виключно в столицю держави.

У свою чергу столиця, споживаючи майже половину бюджету країни, сприяє заселенню сотень тисяч громадян щорічно в Київ, а регіони через відсутність перспектив і депресивність територій залишають сотні тисяч громадян, і коло депресивності замикається.

У районах необхідно припинити практику центрального управління і перерозподілу посад в органах місцевої влади, а спиратися на місцевий актив і потенціал, навіть при формуванні військових адміністрацій.

Не дослухаючись до думки вчених, владні представники губили правильні ідеї і новації, діючи в угоду комерційним і приватним інтересам агрохолдингів і власників бізнесу, амбіціям столичних еліт. На базі країв в умовах воєнного часу необхідно створити військово-адміністративні одиниці виходячи з принципів раціональної організацій територій, а на рівні громад об'єднати громади, що зазнали агресії, з громадами вглибині території, змінивши адмінцентри територій, урахувувати центри економічного тяжіння, транспортну інфраструктуру і воєнно-економічну та



соціально-економічну стійкість до мілітарних викликів.

**Висновки.** Необхідно провести адміністративно-територіальну реформу адміністративними методами, а кадрову політику провести на умовах патріотизму, фаховості, організаційності і спроможності, досвіду і мудрості.

Адміністративно-територіальна реформа буде успішною, коли в суспільстві будуть створені умови соціальної і економічної справедливості в перерозподілі земельних ресурсів, оподаткуванні та інфраструктурному розвитку.

Часові рамки обмежені, а людські ресурси України не безмежні, і тільки загальна мобілізація людського потенціалу, без вікових обмежень, витягне ситуацію з інституційної пастки неефективної багаторічної внутрішньо- економічної політики державного розвитку України.

Крайовий поділ України збільшить значущість столиці держави, яка вийде з полону Київсько-Житомирсько-Чернігівських регіональних інтересів центральної України і стане на вершині адміністративної піраміди, як гідна столиця великої європейської країни.

### Список використаних джерел

1. Шарий Г. І. Розвиток земельних відносин та поліпшення ефективності агровиробництва і стану земельних ресурсів. *Землепорядний вісник*. 2020. № 1. С. 24-29.
2. Адміністративно-територіальний поділ Полтавщини 1648-1941 рр. Довідник з історії адміністративно-територіального поділу / за ред. В. М. Адаменко, В. В. Коротенко; Полтавська обласна рада. Кременчук: «Ент», 2002, 205 с.
3. Ткачук А. Скандинавський шлях. Досвід реформ адміністративно- територіального устрою і місцевого самоврядування в Данії та Швеції. Київ: Лотос, 2015. 124 с.
4. Сипко Б. Де Голль. Видатні особистості історії. Харків: Клуб Сімейного Дозвілля, 2020. 381 с.
5. Полтавська область – Громад. URL: // decentralizion. gov. ua.
6. Шарий Г. І. Краєвий устрій України. *Землепорядний вісник*. Київ, 2015. № 2. С. 41-45.
7. Бурцева О., Власов О. Порівняльний аналіз податкових систем країни ЄС. *Ефективна економіка*. 2017. № 12.
8. Єгупова М. В. Процеси джентрифікації у містах: підходи, трактування, прояви. *Треті Сумські наукові географічні читання: збірник матеріалів Всеукраїнської наук. конф. (м. Суми, 12–14 жовтня 2018 р.)* / СумДПУ імені А. С. Макаренка, Сумський відділ Українського географічного товариства; [упорядник А. О. Корнус]. Суми: СумДПУ імені А. С. Макаренка, 2018. С. 71-73.

---

Шарий Григорій Іванович, доктор економічних наук, завідувач кафедри автомобільних доріг, геодезії та землеустрою, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». ORCID iD: 0000-0001-5098-2661. Тел.: +38 (050) 8504444. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Угненко Євгенія Борисівна, доктор технічних наук, професор кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. E-mail: ugnenko.ievgenia@gmail.com.

Сорочук Наталія Ігорівна, асистент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681. Тел.: +38 (095) 3265929. E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Коростельов Євген Миколайович, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. E-mail: kostya\_90@ukr.net.

---

Ужвієва Олена Миколаївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.  
ORCID iD: 0000-0002-3399-0472. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Шевченко Анна Олександрівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри вишукувань та проектування шляхів сполучення, геодезії та землеустрою, Український державний університет залізничного транспорту.  
ORCID iD: 0000-0001-6276-9761. E-mail: annshevc@gmail.com.

Shariy Grygoriy, Dr. Sc. (Econ.), Professor, Head of the Department of Highways, Geodesy and Land Management of the Yuri Kondratyuk Poltava National Technical University. ORCID iD: 0000-0001-5098-2661.  
Tel.: +38 (050) 850 44 44. E-mail: shariy.grigoriy61@gmail.com.

Uglenko Yevgeniia, Dr. Sc. (Tech.), Professor, Head of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.  
ORCID iD: 0000-0002-3945-788X. E-mail: ugenko.ievgenia@gmail.com.

Sorochuk Nataliia, Assistant of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: 0000-0002-6042-2681.  
E-mail: nat.sorochuk50@gmail.com.

Korostelov Yevhen Mykolaiovych, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.  
ORCID iD: 0000-0002-9589-8196. E-mail: kostya\_90\_@ukr.net.

Uzhviieva Olena, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.  
ORCID iD: 0000-0002-3399-0472. E-mail: elena.uzhviieva.72@gmail.com.

Shevchenko Anna, PhD (Tech.), Associate Professor of the Department of Researches and Design of Means of Communication, Geodesy and Land Management of Ukrainian State University of Railway Transport.  
ORCID iD: 0000-0001-6276-9761. E-mail: annshevc@gmail.com.

Статтю прийнято 9.12.2023 р.

**ТРАНСПОРТНІ ТЕХНОЛОГІЇ (275)**

---

УДК 656.222.6

**УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ВАНТАЖІВ МАРШРУТАМИ  
В НАПРЯМКУ ЗАХІДНИХ КОРДОНІВ УКРАЇНИ**

Кандидати техн. наук А. О. Ковальов, Г. С. Бауліна, Г. Є. Богомазова,  
аспіранти І. В. Керницький., Є. А. Мигалатій

**IMPROVEMENT OF THE PROCESS OF CARGO TRANSPORTATION  
BY ROUTES IN THE DIRECTION TO THE WESTERN BORDERS  
OF UKRAINE**

PhD (Tech.) A. Kovalov, PhD (Tech.) H. Baulina, PhD (Tech.) H. Bohomazova,  
postgraduates I. Kernytskyi, Ye. Myhalatii

***Анотація.** У роботі досліджено процес переміщення вагонопотоків з експортними вантажами в сучасних умовах функціонування залізничного транспорту України. Виявлено основні західні прикордонні переходи, обсяги перевезень і види вантажів, що направляються у країни ЄС. Запропоновано технологію планування перевезення вантажів маршрутами, яка дає можливість раціонально керувати перевізним процесом за умови відправлення поїздів за фіксованим розкладом, що узгоджується з розкладом іноземного перевізника. Використання такої технології дасть змогу зменшити обіг вагонів, час їхнього перебування на прикордонних передавальних станціях обох суміжних держав, отже, усунути додаткові витрати залізниці через нераціональний простій вагонів. Крім того, технологія враховує множини випадків затримки маршруту за фіксованим розкладом. Величину затримки поїзда визначено за допомогою застосування теорії нечітких множин.*

***Ключові слова:** залізничний транспорт, маршрутний поїзд, західний кордон, експортні перевезення вантажів, затримка поїзда.*

***Abstract.** The paper examines the process of movement of carloads with export goods in the modern conditions of railway transport of Ukraine. In the conditions of a full-scale war, after blocking the ports, the export transportation of goods takes place largely through the western border crossings. The volumes of cargo transportation passing through the western border stations, which have been increasing recently, were studied. Bulk cargo, such as grain, iron ore, ferrous metals, and others, is a significant part of cargo transported in the direction of the western borders to the EU countries or in transit through their territory. The transportation of such cargoes is usually organized as part of route trains, since the large volume of the load allows full trains to be accumulated. The technology of planning the transportation of goods by routes is proposed, which makes it possible to rationally manage the transportation process, provided that trains are dispatched according to a fixed schedule that is consistent with the schedule of the foreign carrier. A model of stochastic programming with optimization of operational costs arising in the process of formation and routing of a route train in the direction of the western borders has been developed. The developed model takes into account the probabilistic nature of the formation time of the route train at the loading station, which is subject to the normal distribution law. To ensure the practical*

*implementation of the model, the technological and regulatory conditions reflected in the system of restrictions are taken into account. The use of the proposed technology will make it possible to avoid the processing of wagons in the process of transportation, increase the productivity of rolling stock by reducing the turnover of wagons, optimize the technology of planning the transportation process, and also increase the predictability of cargo shipments for shippers. In addition, the technology takes into account multiple cases of route delays on a fixed schedule. Determining the amount of train delay is solved using the theory of fuzzy sets. Taking into account the received data on the places of delays and their causes, it is necessary to lay time reserves on the route of freight trains moving according to a fixed schedule.*

**Keywords:** railway transport, route train, western border, export cargo transportation, train delay.

**Вступ.** Українська економіка набагато в чому залежить від міжнародної торгівлі. Україна, посідаючи одне з ключових місць на глобальному аграрному ринку, забезпечує експортне постачання суттєвих обсягів продовольства. Наприклад, середньорічний сумарний експорт за останні довоєнні три сезони лише чотирьох ключових товарів – кукурудзи, пшениці, соняшникової олії та соняшникового шроту – оцінюється в 58,1 млн т, що становить понад 14 % сумарного світового експорту зазначених товарів. При цьому для кукурудзи та пшениці середньорічна частка українського експорту в загальному обсязі світової торгівлі оцінюється як 15 та 10 % [1]. Протягом останніх трьох сезонів до 2022 року Україна стабільно посідала четверте і п'яте місця в рейтингу світових експортерів кукурудзи та пшениці. Зростання показників виробництва зерна і відповідно нарощування обсягів експорту свідчили про зростання значущості країни на світовій арені.

До повномасштабного вторгнення на територію України понад 60 % українського експорту здійснювалося через морські порти. Однак у 2022 році постачання більшості українських вантажів було перервано через блокаду українських портів. Проте Україні за підтримки міжнародних організацій вдалося відновити перевезення вантажів, змінивши при цьому логістичний маршрут у бік Євросоюзу. Отже, вантажоперевезення України зазнали значних змін. Вантажі почали прямувати

територією України майже повністю залізничним транспортом у бік європейських країн, переважна більшість з яких – до найближчих країн, що мають виходи до морської навігації, оскільки це найкоротші маршрути і відповідно найдешевші. У той же час нові логістичні маршрути призвели до нових проблем. Однак не тільки Україні довелося зіткнутися з низкою проблем при зміні логістичних маршрутів у бік західних кордонів і блокадою морських портів. Такі зміни торкнулися міжнародного ринку, нашої держави, морського транспорту, а також і залізничного.

Водночас швидко стало зрозуміло, що ні українська, ні європейська залізнична інфраструктура не були готові до прийняття та обробки наявного обсягу вантажів з України. На залізниці виникли додаткові витрати через простой вагонів у черзі на кордоні України з Європейським Союзом (ЄС) і нездатність транзитних залізничних станцій обробити вагонопотік, що виріс. До того ж малі залізничні термінали на території Євросоюзу, різна ширина залізничних колій в Україні та Європі, початкова відсутність інтеграції між залізничними структурами України та сусідніх країн, а також нестача вагонів у європейських залізничних перевізників спричинили низку проблем у залізничній транспортній системі, що потребують невідкладного вирішення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Чимало наукових досліджень

присвячено технології планування, формування составів поїздів, моделюванню залізничних вантажних перевезень при застосуванні різних математичних методів з урахуванням певних параметрів функціонування залізничної системи. Так, для отримання безконфліктної схеми планування та маршрутизації поїздів як у макро-, так і мікрозалізничних мережах визначено спільну оптимізацію проблеми планування та маршрутизації поїздів за допомогою пов'язаної структури моделювання просторово-часових мереж з кількома дозволами [2]. У запропонованій моделі враховувався ряд необхідних обмежень безпеки та вагонопотоку в мережах з різною роздільною здатністю. Для кращого планування руху поїздів у роботі [3] сформовано модель управління пропускною спроможністю, що розподіляє поїзди маршрутами на основі статистичного очікування часу руху, щоб збалансувати залізничний рух. Найкращі початкові маршрути і час відправлення поїздів зі станцій відправлення та в'їзду до мережі, ураховуючи витрати часу на шляху прямування, визначено на основі генетичного алгоритму. Для вирішення завдань одночасної оптимізації маршруту вагона та планування формування поїзда в дослідженні [4] пропонується модель двійкового нелінійного програмування, яка враховує різні експлуатаційні вимоги і обмеження пропускної спроможності та дає змогу мінімізувати загальні витрати на накопичення, формування поїздів і транспортування.

Автори статті [5] зазначають, що визначення оптимальної кількості вагонів у поїзді для окремого маршрутного перевезення можливе при використанні математичної моделі, яка базується на використанні статистичних даних роботи АТ «Укрзалізниця» і враховує всі важливі фактори відносин вантажовласника і залізниці. У роботі [6] розроблено модель формування ступінчастих маршрутів при перевезенні зерна, яка дає змогу визначити

оптимальну кількість вагонів у маршрутному составі. Застосування моделі забезпечить скорочення непродуктивних простоїв рухомого складу та виключення переробки в процесі перевезення.

У дослідженні [7] виконано порівняльний аналіз організації прямування вагонів до пункту призначення при використанні сучасної технології та «за жорсткою ниткою» графіка руху поїздів приватним локомотивом, що доводить доцільність застосування приватної локомотивної тяги для здійснення перевезень контейнерних поїздів. Процес переміщення рухомого складу на напрямку, що враховує можливі ризики при перевезенні вантажу, досліджено в роботі [8]. Виявлено основні причини, що ведуть до виникнення ефекту першої та останньої милі, а саме відсутність необхідної кількості технічно справного рухомого складу у встановлені терміни та істотні труднощі з пропусканням поїздів, зокрема, через припортові та прикордонні станції.

Підхід до вивчення впливу особливостей експлуатації поїздів і станцій на затримки, спричинені порушеннями та перебоями в інтермодальних вантажних залізничних перевезеннях розглянуто у статті [9]. Результати дослідження показують, що вага та довжина поїзда, кількість TEU, вага одного вагона, відстань між станціями є ключовими характеристиками для прогнозування затримок і це розуміння може бути використане для оптимізації вантажних операцій Національної залізничної компанії Люксембурга. Авторами статті [10] досліджено можливості для глобальних ланцюгів постачання товарів на основі так званого нового «Шовкового шляху», який з'єднує Китай із Європою. Основними проблемами, які з'являються на шляху прямування вантажів, є обмеження потужностей через вузькі місця в інфраструктурі та відсутність функціональної сумісності залізниць різних країн. Такі самі труднощі виникають і при

транспортуванні вантажів з України до країн ЄС.

У роботі [11] запропоновано модель маршрутизації з обмеженою пропускною здатністю залізничної мережі, що дає змогу зробити висновки про витрати, пов'язані з навантаженням інфраструктури. Автори пропонують п'ять сценаріїв зміни маршрутів прямування вагонів у короткі терміни і показують вартісну залежність через такі дії. Але запропонована модель базується на повагонних відправленнях залізницею Німеччини, не враховуючи можливість прямування вагонів у міжнародному сполученні. Включення інших європейських країн може продемонструвати подальший потенціал такої моделі.

У секторі автомобільних вантажних перевезень висока фрагментація ринку викликала серйозну проблему неефективного транспортного планування та порожнього пробігу, що призвело до негативних наслідків, таких як збільшення вартості доставки. Тому в роботі [12] основну увагу приділено горизонтальному транспортному співробітництву, у якому група конкуруючих компаній, тобто вантажовідправників, перевізників або одержувачів погоджується співпрацювати. Це називається спільними транспортними мережами. У більшості сценаріїв співробітництва компанії (партнери) повинні ділитися інформацією про свої транспортні замовлення та рухомий склад із центральним координатором, наприклад постачальником логістичних послуг. Така організаційна структура та модель оперативного управління і підтримки прийняття рішень може мати багато проблем і перешкод, але при врахуванні ризиків використання запропонованої технології може дати додатковий прибуток учасникам перевезень і підвищити функціонування транспортної мережі в цілому. Зображені принципи можуть бути використані при застосуванні кільцевих маршрутів на залізничному транспорті.

Гіпотеза дослідження [13] полягає в детальному розгляді процесу накопичення вагонів з урахуванням прибуття окремих груп вагонів, визначенні варіантів вантажних поїздів з фіксованим графіком руху та обґрунтуванні аналітичних залежностей, що визначають вартість перевезення, вагоно-годин для накопичення поїздів і отримання на цій основі нових наукових результатів. Їхнє практичне використання полягає в більш точному та обґрунтованому нормуванні часу простою вагонів при накопиченні, а також уточненні методики розрахунку плану формування поїздів. При цьому в роботі не враховано можливість появи стохастичних процесів на транспорті.

У статті [14] запропоновано комплексну модель оптимізації плану формування поїздів із використанням як одногрупних, так і двогрупних поїздів на основі китайської залізничної мережі з використанням гібридного генетичного алгоритму і табу-пошуку. Модель спрямована на досягнення максимальної економії вагоно-годин на станціях за рахунок заміни одногрупних поїздів на двогрупні, що мають свої технічні переваги.

Отже, питанню удосконалення організації перевезення вантажів залізничним транспортом приділено багато уваги як в Україні, так і за кордоном. Однак проблема удосконалення технології перевезення експортних вантажів маршрутами в сучасних умовах ще потребує суттєвих досліджень.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є формування технології планування перевезення вантажів маршрутами, яка дає можливість раціонально управляти перевізним процесом, що здійснюється за фіксованим розкладом, з урахуванням затримок у процесі доставляння вантажів у напрямку західних кордонів. Для реалізації зазначеної мети було поставлено та вирішено такі завдання:

- проаналізовано показники експортних перевезень вантажів у напрямку західних кордонів;

- сформовано оптимізаційну модель технології планування перевезення вантажів у складі маршрутних поїздів для якісного управління перевізним процесом, що організовано за фіксованим розкладом;

- визначено величину затримки, що впливає на своєчасність надходження маршруту до західного кордону для передавання вантажу іноземному перевізнику.

**Основна частина дослідження.** В умовах повномасштабної війни після блокування портів експортно-імпортні перевезення вантажів переважно

відбуваються через західні прикордонні переходи, де ключову роль відіграє саме залізничний транспорт. Експортні перевезення в цьому напрямку у 2022 р. склали близько 34 млн т (рис. 1), що більше на 10 млн т порівняно з 2021 р. Збільшився експорт зернових вантажів у країни Європейського Союзу і склав у 2022 р. 33,2 % в загальній структурі експорту зерна. До 2022 р. через сухопутні шляхи було перевезено лише 2 % експорту зернових. Через залізничні прикордонні переходи між Україною та Польщею у 2022 р. було передано 16,9 млн т вантажів, що на 4,5 млн т, або на 36,7 %, більше, ніж за 2021 р.

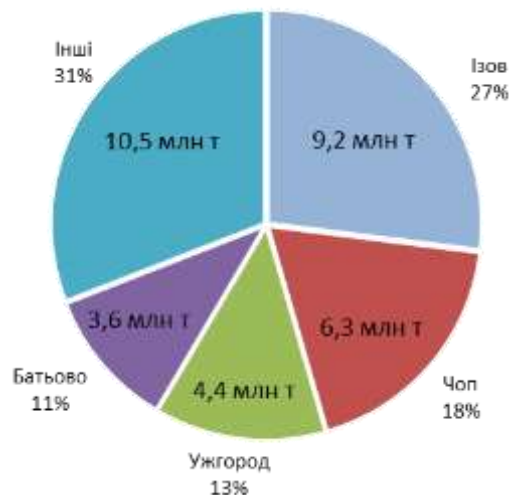


Рис. 1. Діаграма обсягів експортних перевезень вантажів через західні прикордонні станції за 2022 р.

Значну частку вантажів, що перевозяться в напрямку західних кордонів до країн Європейського Союзу (ЄС) або транзитом їхньою територією складають навалочні вантажі, такі як зерно, руда залізна, чорні метали тощо (рис. 2). Перевезення таких вантажів, як правило, організовується у складі маршрутних поїздів, оскільки великий обсяг навантаження дає змогу накопичувати

повносоставні поїзди. Крім того, підвищення маршрутизації перевезень – один із способів підвищення продуктивності вагонів. Це пов'язано зі звільненням від переробки мінімум однієї технічної станції, завдяки чому підвищується транзитність поїздопотоків, збільшується швидкість їхнього пересування.

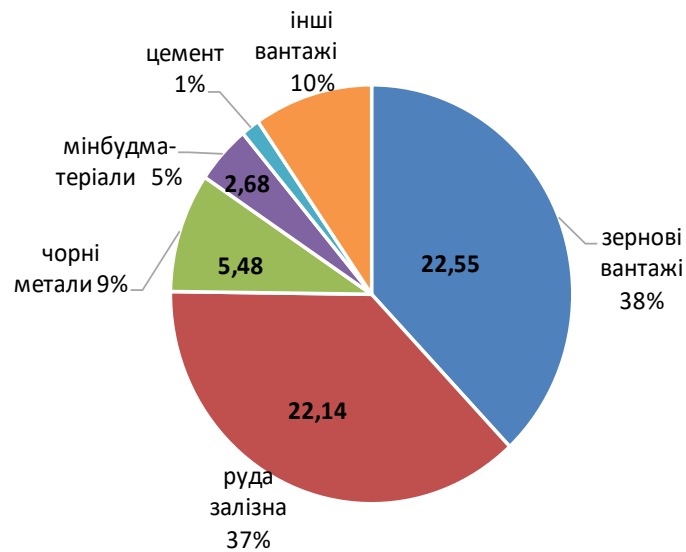


Рис. 2. Діаграма розподілу обсягів перевезення різних видів вантажів (млн т) в експортному сполученні за 2022 р.

На сьогодні залізничні перевезення вантажів маршрутами та вагонними відправками здійснюються «за готовністю», що дає змогу перевезти більший обсяг вантажів мережею, а також задіяти велику кількість малопотужних станцій навантаження. Проте при цьому зменшується прогнозованість точного терміну доставки вагонів до кордону для передання вантажів з колії шириною 1520 мм на європейську колію шириною 1435 мм. Саме це ускладнює процес виконання перевезень у країні ЄС, тому що європейські вантажні поїзди прямують за фіксованим розкладом. У зв'язку з цим іноземний перевізник на кордоні приймає вантажі за своїм узгодженим планом відповідно до розкладу руху поїздів. Проте АТ «Укрзалізниця» не має можливості підводити до кордону вагони в необхідний час, у зв'язку з чим збільшується час простою вагонів на прикордонних передавальних станціях і підходах до них, що веде до підвищення витрат залізниці. Чітка організація роботи залізниць суміжних країн забезпечить для української залізниці більш сприятливі умови для залучення додаткових обсягів експортно-імпорتنих вантажів [15]. Тому для вирішення зазначеної проблеми пропонується здійснювати організацію

прямування маршрутних поїздів при дотриманні фіксованого розкладу. Таку систему організації перевезення вантажів доцільно використовувати при стабільних обсягах навантаження на станціях відправлення навантаженого маршруту саме при перевезенні зерна, руди та чорних металів. Зі збільшенням вагонів, задіяних у перевезенні вантажів за розкладом руху маршрутних поїздів, за дослідженням [16], в елементі обігу вагона – простій вагона на технічних станціях – дає змогу значно скоротити загальний обіг вагона. Існує значний позитивний вплив такої технології також і на скорочення простою вагона під вантажними операціями.

Так виникає завдання оптимізації технології планування перевезення вантажів маршрутами, що дає можливість раціонально управляти перевізним процесом. Пропонується відправляти маршрути за узгодженим розкладом з іноземним перевізником. Як критерій оптимізації необхідно обрати експлуатаційні витрати, що виникають при реалізації процесу формування та прямування маршрутного поїзда в напрямку західних кордонів. Цільову функцію, що відповідає обраному критерію, можна подати в такому вигляді:



$$F(n_m) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{t_{\min}}^{t_{\max}} t_{\text{форм}} e^{-\frac{(t_{\text{форм}} - \bar{t}_{\text{форм}})^2}{2\sigma^2}} dt_{\text{форм}} \frac{F_{\text{форм}}}{n_m} + \frac{t_{\text{прям}} F_{n.зод} n_m}{t_{\text{дост}} Q_{\text{пр.зд}}} + \frac{t_{\text{пов}} F_{\text{пов}}}{n_m} + F_3 \cdot \omega(X) \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $n_m$  – состав маршрутного поїзда, ваг;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення випадкової величини від її математичного очікування  $\bar{t}_{\text{форм}}$ ;

$t_{\min}, t_{\max}$  – мінімальний і максимальний час перебування вагонів під формуванням состава маршрутного поїзда відповідно, год;

$t_{\text{форм}}$  – час формування состава маршрутного поїзда, год;

$F_{\text{форм}}$  – витрати на формування состава маршрутного поїзда, грн/год;

$t_{\text{прям}}$  – час прямуювання маршрутного поїзда, год;

$F_{n.зод}$  – витрати при прямуюванні маршрутного поїзда за фіксованим розкладом, грн/ваг;

$t_{\text{дост}}$  – тривалість доставки вантажу до західного кордону України, год;

$Q_{\text{пр.зд}}$  – пропускна здатність напрямку, ваг;

$t_{\text{пов}}$  – час на повернення порожніх вагонів, год;

$F_{\text{пов}}$  – витрати, пов'язані з поверненням порожніх вагонів, грн/год;

$F_3$  – витрати, пов'язані з можливими затримками вагонів, що виникають у процесі формування та переміщення маршрутного поїзда, грн/ваг;

$\omega(X)$  – нечітка функція, що відображує множину випадків затримки маршруту ( $X$ ) за фіксованим розкладом.

Перша складова цільової функції відображує витрати на станції формування маршруту, що виникають при здійсненні маневрових операцій з подавання та

прибирання вагонів на вантажні fronti підприємств, накопиченні состава та очікуванні початку виконання технологічних операцій. Проведені дослідження довели, що час формування маршруту  $t_{\text{форм}}$  має стохастичний характер.

Для його найкращого відображення запропоновано використання функції щільності розподілу, пов'язаної з нормальним законом розподілу. Другий доданок моделює витрати, пов'язані з прямуюванням маршрутного поїзда за фіксованим розкладом з урахуванням часу перебування вагонів на прикордонній станції. Третій доданок відповідає витратам, пов'язаним із поверненням порожніх вагонів. Остання складова цільової функції відображує витрати, пов'язані з можливими затримками вагонів, що виникають у процесі формування та переміщення маршрутного поїзда.

Для забезпечення практичної реалізації задачі необхідно враховувати обмеження, які накладаються на керуючу змінну та параметри запропонованої оптимізаційної моделі:

$$\begin{cases} n_m q_{\text{ст}} + Q_{\text{лок}} + n_m q_m \leq Q_m \\ n_m \leq m_m \\ n_m \leq L_k \\ t_{\text{форм}} \leq t_{\text{норм}} \\ t_{\text{прям}} \leq t_{\text{дост}} \\ V_m \leq V_{\text{доп}} \end{cases}, \quad (2)$$

де  $q_{\text{ст}}$  – статичне навантаження вагона, т/ваг;

$Q_{\text{лок}}$  – вага поїзного локомотива, т;

$q_m$  – маса тари вагона, т/ваг;

$Q_m$  – норма маси маршрутного поїзда брутто, т;

$m_m$  – максимальний состав маршрутного поїзда, ваг;

$L_k$  – довжина приймально-відправних колій станцій відправлення та призначення, ваг;

$t_{норм}$  – нормативний час формування состава маршрутного поїзда, год;

$V_m$  – швидкість прямування маршрутного поїзда, км/год;

$V_{дон}$  – допустима швидкість прямування поїздів на певному напрямку, км/год.

Перше обмеження встановлює умову, за якої маса маршрутного поїзда не має перевищувати максимально допустиму норму маси маршруту на цьому напрямку. Состав сформованого маршрутного поїзда має відповідати максимальному составу та довжині приймально-відправних колій станцій, що зазначено у двох наступних умовах. Четверте обмеження визначає дотримання умови щодо відповідності часу формування состава нормативному часу. Наступне обмеження встановлює, що час прямування маршрутного поїзда не має перевищувати встановлений розкладом час доставки вантажу до західного кордону. Остання умова обмежує переміщення маршруту з перевищенням допустимої швидкості.

Для забезпечення ефективної діяльності та комплексного розвитку залізничної галузі необхідно враховувати певні фактори, що впливають на транспортні операції [17]. У процесі перевезення вантажів можуть виникати затримки на різних його стадіях, які необхідно враховувати при плануванні маршруту в міжнародному сполученні за

фіксованим розкладом. На величину затримки маршруту впливає ряд незалежних параметрів (причин затримки поїзда), тому її доцільно віднести до класу слабо структурованих задач і розв'язувати за допомогою застосування методів нечіткої логіки.

Нечітка підмножина  $A$  визначається як множина упорядкованих пар  $A = \{\mu_A(x)/x\}$ , де  $\mu_A$  – функція належності, що набуває значення в певній цілком упорядкованій множині  $M$ , яка дорівнює  $M = [0,1]$ . Функція належності вказує ступінь належності елемента  $x$  підмножині  $A$  [18].

Множину випадків затримки маршруту за фіксованим розкладом можна подати у вигляді п'яти найрозповсюдженіших причин збоїв у процесі перевезення вантажних поїздів

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}, M = [0;1], \quad (3)$$

де  $x_1$  – затримка поїзда через пошкодження інфраструктури;

$x_2$  – затримка поїзда при відправленні зі станції формування;

$x_3$  – затримка по прибуттю на прикордонну передавальну станцію;

$x_4$  – затримка поїзда на шляху прямування;

$x_5$  – затримка через людський фактор.

Формалізацію процедури визначення часу затримки маршрутного поїзда за фіксованим розкладом можна подати у вигляді нечітких змінних:  $\langle x_1, T_1, A \rangle$ ,  $\langle x_2, T_2, B \rangle$ ,  $\langle x_3, T_3, C \rangle$ ,  $\langle x_4, T_4, D \rangle$ ,  $\langle x_5, T_5, K \rangle$ . Відтворення нечітких змінних набувають вигляду

$$\langle x_1, T_1, A \rangle \rightarrow \langle \text{"Пошкодження інфраструктури"}, T_1, [a_{\min}, a_{\max}] \rangle, \quad (4)$$

де  $T_1 = \{ \text{"до 30 хвилин"}, \text{"в межах години"}, \text{"понад 1 годину"} \};$

$a_{\min}, a_{\max}$  – діапазон значень  $A = \{a\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину часу затримки поїзда через пошкодження інфраструктури у зв'язку з воєнними діями.

$$\langle x_2, T_2, B \rangle \rightarrow \langle \text{"По відправленню"}, T_2, [b_{\min}, b_{\max}] \rangle, \quad (5)$$

де  $T_2 = \{ \text{"до 10 хвилин"}, \text{"від 10 до 30 хвилин"}, \text{"понад 30 хвилин"} \};$

$b_{\min}, b_{\max}$  – діапазон значень  $B = \{b\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину часу затримки поїзда при відправленні зі станції формування маршруту у зв'язку зі збоями та несправностями технічних засобів, збоїв технологічних процесів у вантажовідправника.

$$\langle x_3, T_3, C \rangle \rightarrow \langle \text{"По прибуттю"}, T_3, [c_{\min}, c_{\max}] \rangle, \quad (6)$$

де  $T_3 = \{ \text{"до 30 хвилин"}, \text{"в межах години"}, \text{"понад 1 годину"} \};$

$c_{\min}, c_{\max}$  – діапазон значень  $C = \{c\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину часу затримки поїзда за фіксованим розкладом на прикордонній передавальній станції.

$$\langle x_4, T_4, D \rangle \rightarrow \langle \text{"На шляху прямування"}, T_4, [d_{\min}, d_{\max}] \rangle, \quad (7)$$

де  $T_4 = \{ \text{"за розкладом"}, \text{"можливо за розкладом"}, \text{"поза розкладом"} \};$

$d_{\min}, d_{\max}$  – діапазон значень  $D = \{d\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує час надходження маршруту на стикову передавальну станцію через можливість затримки поїзда на шляху прямування.

$$\langle x_5, T_5, K \rangle \rightarrow \langle \text{"На шляху прямування"}, T_5, [k_{\min}, k_{\max}] \rangle, \quad (8)$$

де  $T_5 = \{ \text{"незначний"}, \text{"середній"}, \text{"значний"} \};$

$k_{\min}, k_{\max}$  – діапазон значень  $K = \{k\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує час затримки через можливість нестачі кваліфікованих кадрів, задіяних у перевізному процесі.

Формалізацію комплексу процедур визначення можливих затримок при просуванні маршрутного поїзда за узгодженим розкладом з іноземним перевізником зображено через набір функцій належності з відповідними параметрами.

Можливість відправлення маршрутного поїзда з урахуванням всіх

затримок на українській залізниці можна подати як лінгвістичну змінну  $\langle X, T, Y, G, M \rangle$ , при цьому  $T$  – термножина або множина значень, що являють собою імена нечітких змінних, областю визначення кожної з яких є множина  $Y$ ;  $G$  – синтаксична процедура, що дає змогу

оперувати елементами терм-множини  $T$ , зокрема генерувати нові терми (значення);  $M$  – семантична процедура, що дає змогу перетворити кожне нове значення

лінгвістичної змінної, утвореної процедурою  $G$ , у нечітку змінну, тобто сформувати відповідну нечітку множину.

$$\langle X, T, Y, G, M \rangle \rightarrow \langle \text{"Затримка"}, T, [y_{\min}, y_{\max}] \rangle, \quad (9)$$

де  $T$  – терм-множина, яка включає узагальнюючі дані всіх можливих затримок, і набуває вигляду  $T = \{ \text{"незначна"}, \text{"допустима"}, \text{"значна"}, \text{"велика"} \}$ ;

$y_{\min}, y_{\max}$  – діапазон значень  $Y = \{y\}$  відповідної нечіткої змінної, яка характеризує величину затримки поїзда за фіксованим розкладом з урахуванням усіх можливих простоїв, що впливають на своєчасність надходження маршруту до прикордонної передавальної станції.

На основі масиву нечітких даних було згенеровано модель у вигляді системи нечіткого виводу, яка моделює величину затримки. На рис. 3 наведено терм-множину вихідної змінної, побудовану в середовищі Matlab. Завдяки застосуванню методів нечіткої логіки визначено величину затримки, що впливає на своєчасність

надходження маршруту до західного кордону для передання вантажу іноземному перевізнику. Ураховуючи отримані дані про місця затримок і причини їх виникнення, необхідно закладати резерви часу на маршруті вантажних поїздів, що рухаються за фіксованим графіком.

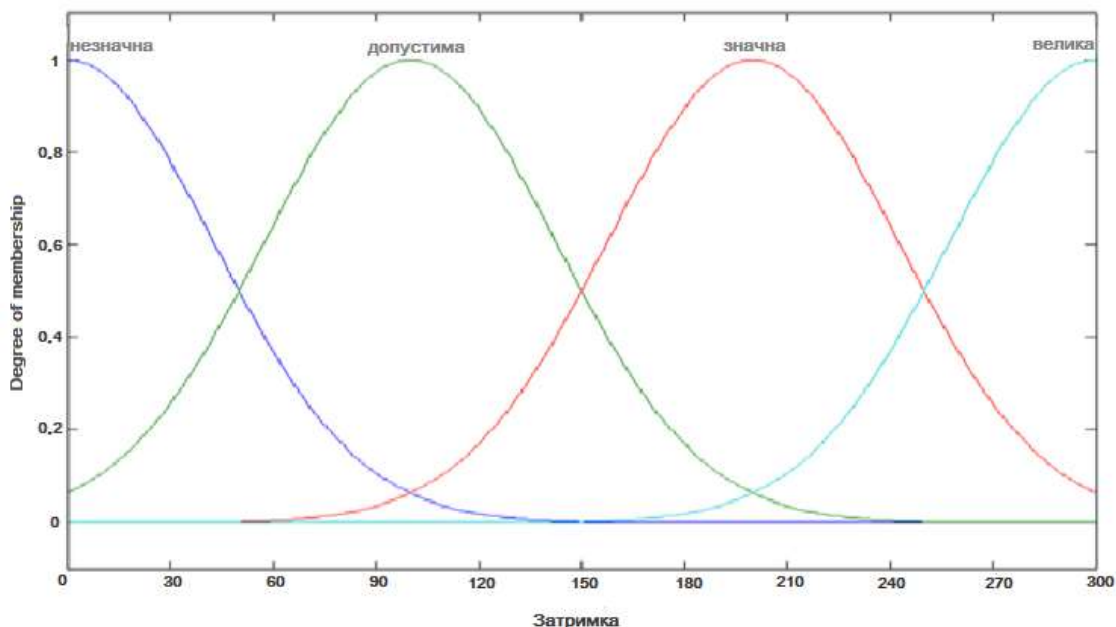


Рис. 3. Відображення лінгвістичної змінної затримки поїзда

У результаті моделювання доведено, що існує екстремум цільової функції типу мінімум, що дає змогу сформувати процедуру оптимального управління параметрами перевезення. З урахуванням величини затримки та системи обмежень найменші експлуатаційні витрати склали 6147,80 грн/ваг при прямуванні 54 вагонів у маршрутному поїзді на відстань 593 км. При цьому загальний час перевезення вантажів у маршрутному поїзді в напрямку західного кордону України склав 81 год (або 3,375 доби) з урахуванням операцій, пов'язаних з відправленням і прибуттям вагонів і їхнім перебуванням на прикордонній станції. У результаті розрахунків отримано зменшення експлуатаційних витрат майже на 8 % порівняно з чинною технологією перевезення вантажів маршрутами «за готовністю» (6633,48 грн/ваг). Скорочення витрат було отримано за рахунок зменшення часу простою вагонів на 12 %.

Розроблену модель можна вважати достатньо універсальною за своєю структурою і використовувати її при перевезенні масових навалочних вантажів маршрутами за фіксованим розкладом. При цьому будуть змінюватися тільки параметри моделі, що залежать від особливостей формування маршрутного поїзда, виконання маневрових, вантажних операцій, його схеми курсування та місцевих умов. Така модель дає змогу управляти процесом перевезення вантажів у складі маршрутного поїзда до західного кордону з найменшими експлуатаційними витратами перевізника, яким виступає залізниця. Сформовану модель доцільно інтегрувати до автоматизованих систем управління суб'єктів перевізного процесу.

Отже, використання запропонованої технології управління процесом формування та руху маршруту за фіксованим розкладом до західного кордону України дасть змогу уникнути обробки вагонів у процесі перевезення, зменшити час їхнього перебування на

прикордонних передавальних станціях обох суміжних держав, підвищити продуктивність рухомого складу за рахунок скорочення обігу вагонів, оптимізувати технологію планування перевізного процесу з урахуванням розглянутих затримок, а також збільшити прогнозованість відвантажень вантажів для вантажовідправників. Крім того, буде забезпечена узгоджена та ритмічна робота підприємств-вантажовідправників, станцій, ділянок залізниць і вчасне доставлення вантажів до кордону, синхронізація подальших перевантажувальних операцій і ниток графіка руху вантажних поїздів з іноземними перевізниками.

**Висновки.** У роботі досліджено експортні перевезення вантажів та встановлено, що на сьогодні вони переважно відбуваються через західні прикордонні переходи. Західний кордон України став основним логістичним коридором. Значну частину вантажів, що перевозяться до країн Європейського Союзу або транзитом по їхній території, складають навалочні вантажі, такі як зерно, руда залізна та чорні метали. Перевезення таких вантажів розглядається у складі маршрутних поїздів, що будуть прямувати за фіксованим розкладом для уникнення ускладнень у процесі виконання перевезень у країні ЄС.

За таких умов сформовано модель стохастичного програмування з оптимізацією технології планування перевезення вантажів маршрутами при дотриманні фіксованого розкладу з урахуванням можливих затримок, яка дає можливість раціонально управляти перевізним процесом. Як критерій оптимізації враховано експлуатаційні витрати, що виникають у процесі формування та прямування маршрутного поїзда в напрямку західних кордонів. Розроблена модель ураховує ймовірнісний характер часу формування состава маршрутного поїзда на станції навантаження, що підлягає нормальному

закону розподілу. Для забезпечення практичної реалізації моделі враховано технологічні та нормативні умови, відображені в системі обмежень. Використання запропонованої технології дасть змогу значно покращити виробничі показники АТ «Укрзалізниця», тобто забезпечить виключення обробки вагонів у процесі перевезення, зменшення часу обігу вантажного вагона, оптимізацію процесу планування перевезення навалочних вантажів, а також збільшення прогнозованості часу перетину вагоном кордону. Таку модель доцільно інтегрувати до автоматизованих систем управління всіх учасників перевізного процесу.

Встановлено величину затримки, що впливає на своєчасність прибуття маршрутного поїзда до західного кордону для передання навалочного вантажу іноземному перевізнику. На величину затримки впливає ряд незалежних параметрів, тому для її визначення застосовано методи нечіткої логіки. Урахування даних про затримки, викликаних виникненням збоїв при транспортуванні, дасть змогу обмежити їхній вплив на перевізний процес за рахунок раннього попередження, а при плануванні – можливість закладати резерви часу на маршруті вантажних поїздів, що рухаються за фіксованим розкладом.

### Список використаних джерел

1. Експорт лише чотирьох ключових аграрних товарів з України щорічно становить близько 60 млн тонн. URL: <https://www.apk-inform.com/uk/news/1526701>.
2. Wang E., Yang L., Li P., Zhang C., Gao Z. Joint optimization of train scheduling and routing in a coupled multi-resolution space-time railway network. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 147, 103994. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103994>.
3. Murali P., Ordóñez F., Dessouky M. Modeling strategies for effectively routing freight trains through complex networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. Vol. 70. P. 197-213. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2015.08.022>.
4. Lin B., Zhao Y., Lin R., Liu C. Integrating traffic routing optimization and train formation plan using simulated annealing algorithm. *Applied Mathematical Modelling*. Vol. 93, 2021. P. 811-830. DOI:10.1016/j.apm.2020.12.031
5. Ломотько Д. В., Балака Є. І., Резуненко М. Є. Логістичні підходи щодо оптимізації складу маршрутних поїздів в системі «вантажовласник – залізниця». *Залізничний транспорт України*. 2020. № 4. С. 4-14. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/13270>.
6. Бауліна Г. С., Богомазова Г. Є, Мішков В. С. Розробка моделі формування ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами на залізницях України. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2019. Вип. 187. С. 42-52. URL: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/1799>.
7. Бутько Т. В., Харланова С. В., Шахраюк В. А. Підходи до удосконалення контейнерних інтермодальних перевезень в умовах впровадження приватної локомотивної тяги. *Інформаційно-керуючі системи на залізничному транспорті*. 2021. № 1. С. 16-23. URL: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v26i1.229018>.
8. Butko T., Kostienikov O., Parkhomenko L., Prohorov V., Bogomazova G. Formation of an automated technology of cargo transportation control on the direction. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2019. Vol. 1, № 3 (97). P. 6–13. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.156098>.
9. Pineda-Jaramillo J., Viti F. Identifying the rail operating features associated to intermodal freight rail operation delays. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 147, 103993. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103993>.

10. Wagener N., Aritua B., Zhu T., 2020. The New Silk Road: Opportunities for Global Supply Chains and Challenges for Further Development. *LogForum. Scientific Journal of Logistics*. 2020. Vol. 16 (2). P. 193-207. URL: <http://doi.org/10.17270/J.LOG.2020.403>.
11. Krauth M., Haalboom D. An Economic View on Rerouting Railway Wagons in a Single Wagonload Network to Avoid Congestion. *European Transport Research Review. An Open Access Journal*. 2022. Iss. 14:48. 9 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-022-00573-y>.
12. Karam A., Reinau K. H., Østergaard C. R. Horizontal Collaboration in the Freight Transport Sector: Barrier and Decision-Making Frameworks. *European Transport Research Review. An Open Access Journal*. 2021. Iss. 13(1):53. 22 p. URL: <https://doi.org/10.1186/s12544-021-00512-3>.
13. Svetashev A., Kamaletdinov S., Svetasheva N., Mustaeva G. Formation of the Freight Trains With a Fixed Train Schedule. *E3S Web of Conferences. CONMECHYDRO – 2021*. 2021. Iss. 264, 05040. 8 p. URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405040>.
14. Xiao J., Lin B., Wang J. Solving the train formation plan network problem of the single-block train and two-block train using a hybrid algorithm of genetic algorithm and tabu search. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*. 2018. Vol. 86. P. 124–146. URL: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2017.10.006>.
15. Бауліна Г. С., Дідух П. О., Карпаш А. М., Федорняк І. І. Удосконалення технології функціонування перевантажувального комплексу прикордонної перевантажувальної станції. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. Харків: УкрДУЗТ, 2016. Вип. 162. С. 182-189. URL: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.162.2016.78448>.
16. Prokhorchenko A., Kravchenko M. & Gurin, D. Дослідження впливу технології перевезень вантажів за розкладом руху на макропоказники залізничної системи України. *Збірник наукових праць ДУІТ. Серія «Транспортні системи і технології»*. 2020. 36, С. 184-198. URL: <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2020-36-19>.
17. Baulina H., Bohomazova H., Prodashchuk S. Technological proposal for the attention of the risk in the management of the work of a railway station with a port. *Revista de la Universidad del Zulia*, 2023. 14 (39), P. 400-414. URL: <http://dx.doi.org/10.46925/rdluz.39.22>.
18. Субботін С. О. Подання й обробка знань у системах штучного інтелекту та підтримки прийняття рішень: навч. посіб. Запоріжжя: ЗНТУ, 2008. 341 с.

---

Ковальов Антон Олександрович, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8546-3183>. E-mail: [kovalov.uvkr@kart.edu.ua](mailto:kovalov.uvkr@kart.edu.ua).

Бауліна Ганна Сергіївна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8464-1507>. E-mail: [baulina.uvkr@kart.edu.ua](mailto:baulina.uvkr@kart.edu.ua).

Богомазова Ганна Євгенівна, кандидат технічних наук, доцент кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8042-0624>. E-mail: [bogomazova.uvkr@kart.edu.ua](mailto:bogomazova.uvkr@kart.edu.ua).

Керницький Іван Вікторович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

Мигалатій Євген Анатолійович, аспірант кафедри управління вантажною і комерційною роботою, Український державний університет залізничного транспорту.

Kovalov Anton, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0001-8546-3183>.

E-mail: [kovalov.uvkr@kart.edu.ua](mailto:kovalov.uvkr@kart.edu.ua).

Baulina Hanna, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-001-8464-1507>.

E-mail: [baulina777@gmail.com](mailto:baulina777@gmail.com).

---

Bohomazova Hanna, PhD (Tech), Associate Professor of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport. ORCID iD: <https://orcid.org/0000-0002-8042-0624>.

E-mail: bogomazova.uvkr@kart.edu.ua.

Kernytskyi Ivan, postgraduate of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

Myhalatii Yevhen, postgraduate of the Department of Cargo and Commercial Work Management, Ukrainian State University of Railway Transport.

Статтю прийнято 28.11.2023 р.



## ЗАЛІЗНИЧНИЙ ТРАНСПОРТ (273)

---

УДК 629.4.06:621.822.614

### ЗАСТОСУВАННЯ ВІБРОДІАГНОСТИКИ БУКСОВИХ ВУЗЛІВ ВАНТАЖНИХ ВАГОНІВ ДЛЯ ЗНИЖЕННЯ РИЗИКІВ ВІДМОВ

Асп. І. В. Піценко

### APPLICATION OF VIBRATION DIAGNOSTICS OF AXLE BOXES OF FREIGHT CARS TO REDUCE THE RISK OF FAILURES

Postgraduate I. V. Pitsenko

***Анотація.** Дослідження обґрунтовує застосування методу вібраційної діагностики вантажних вагонів для зменшення ризику відмов буксових вузлів. У статті зазначено, що використання вібраційної діагностики буксових вузлів вантажних вагонів призводить до зниження ризиків на залізничному транспорті у 2,5 рази. Розроблений метод визначення ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів має практичне значення для забезпечення оцінювання безпеки залізничного транспорту.*

*Експериментальні дослідження підтверджують зменшення ризику відмов буксових вузлів вантажних вагонів від 1,125 до 5,000 разів. Отриманий ефект використання вібраційної діагностики буксових вузлів вантажних вагонів також супроводжується економічними вигодами, оцінюваними від 13 до 44 тис. грн для відповідного експлуатаційного пробігу вантажного вагона.*

*Це дослідження розширює розуміння можливостей вібраційної діагностики як ефективного інструменту для забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті. Ураховуючи практичність методу та підтвердження його успішності через експериментальні дані, автор наводить засоби для підвищення безпеки та ефективності вантажних перевезень на залізниці.*

***Ключові слова:** вібродіагностика, буксові вузли, вантажні вагони, зниження ризиків, відмови.*

***Abstract.** The research presented in this study advocates for the adoption of vibration diagnostics as a method to mitigate the risk of axle box failures in freight cars, emphasizing its significant impact on enhancing the safety of railway transportation. The authors assert that employing vibration diagnostics for axle boxes in freight cars results in a noteworthy 2.5-fold reduction in risks within the realm of railway transport.*

*The practical implications of the developed diagnostic method extend to its capacity for assessing the safety of railway transport, offering a valuable tool for risk evaluation. Experimental studies conducted as part of this research further validate the effectiveness of the method, revealing a substantial decrease in the risk of axle box failures by a factor ranging from 1.125 to an impressive times. This empirical evidence solidifies the credibility and applicability of vibration diagnostics in averting potential failures in axle boxes.*

*From an economic standpoint, the implementation of vibration diagnostics for axle box units demonstrates a tangible impact, with cost savings ranging from 13 to 44 thousand UAH*

*corresponding to the operational mileage of a freight car. This underscores not only the safety benefits but also the economic advantages associated with the utilization of vibration diagnostics in the maintenance and operation of railway transport.*

*The findings of this research contribute to a more comprehensive understanding of the capabilities of vibration diagnostics as a powerful and effective tool in ensuring the safety of railway transportation. By highlighting the practical applicability of the method and supporting its success through empirical data, the authors advocate for its widespread adoption as a means to bolster the safety and efficiency of freight transportation by rail. In essence, this study provides a robust foundation for the integration of vibration diagnostics into routine maintenance practices, offering a proactive approach to minimizing risks and optimizing the performance of axle box units in freight cars.*

**Keywords:** *vibration diagnostics, axle boxes, freight cars, risk reduction, failures.*

**Вступ.** На залізничний транспорт на внутрішньому ринку припадає велика частина транспортних послуг, пов'язаних з організацією та забезпеченням процесу перевезення вантажів і пасажирів. Одним із головних завдань залізничного транспорту, а також важливою складовою його ефективної роботи і розвитку є забезпечення безпеки руху, на яку безпосередньо впливає надійність елементів рухомого складу і технічних засобів усієї інфраструктури.

Успішне вирішення завдання забезпечення необхідного рівня безпеки руху на залізниці полягає в підтримуванні належного технічного стану і надійності вагонного парку, оскільки українські залізниці, найбільше за обсягом, виконують перевезення вантажів. Безпека руху при цьому може бути оцінена ризиками можливих відмов вантажних вагонів після виконання технічного обслуговування та ремонту. Тому забезпечення низьких значень ризиків у процесі експлуатації залізничного транспорту під час технічного обслуговування та ремонту може бути досягнуто належним процесом діагностування вантажних вагонів, оскільки вони складають найбільшу частину з усього рухомого складу при вантажних перевезеннях.

З відомої статистичної інформації про відмови елементів вантажних вагонів випливає, що найбільша частка кількості відмов припадає на буксові вузли.

Ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів вказують на можливість виникнення проблем (відмов) і надзвичайних ситуацій у роботі цих вузлів. Ці ризики можуть бути викликані інтенсивною експлуатацією, неякісним ремонтом, зносом матеріалів, впливом зовнішніх факторів тощо. Вони можуть призвести до непланових зупинок, аварій, а також збитків і небезпеки руху на залізничному транспорті. Такі ризики підкреслюють важливість систем діагностики, обслуговування та ефективного управління для попередження відмов, убезпечення та надійності вантажних вагонів.

Під час аналізу відмов буксових вузлів вантажних вагонів було встановлено, що майже всі відмови пов'язані з неякісно проведеним ремонтом чи технічним обслуговуванням, на які істотно впливає недодержання технології виконання, у т. ч. і людський фактор. Для зниження ризиків, що допускаються при ремонті і технічному обслуговуванні вантажних вагонів, можуть бути застосовані методи діагностування буксових вузлів з подальшим розрахуванням ризиків для оцінювання та прогнозування безпеки руху на залізничному транспорті.

Оскільки АТ «Українська залізниця» має на меті реформування та імплементацію вимог законодавства ЄС, то застосування процесу діагностування буксових вузлів вантажних вагонів для

зниження ризиків на залізничному транспорті є актуальною темою дослідження.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У кожній країні світу характерним є застосування окремого підходу до оцінювання безпеки руху поїздів на мережі залізниць. Проте в кожній країні світу існує єдина думка щодо оцінювання безпеки руху як на залізницях, так і інших видах транспорту. Отже, оцінювання безпеки руху описується ризиками – технічними, технологічними, організаційними, управлінськими тощо.

У роботі [1] наведено ідентифікацію ризиків, які виникають у транспортній системі, і на основі аналізу виявлених ризиків пропонується заходи щодо оптимального функціонування транспортної системи. Водночас не враховано неможливість заміни засобу ланцюжка транспортної системи.

Метод кількісного оцінювання ризиків у Нідерландах [2] для визначення безпеки руху при перевезенні орієнтований виключно на жертви зі смертельними наслідками.

Оскільки моніторинг залізничної інфраструктури є життєво важливим завданням для забезпечення безпеки руху залізничних перевезень, у роботі [3] для оцінювання ризику відмов рейок використовують імовірність їхніх відмов на основі відеоспостережень. Оцінювання ризику відмов наведено для завантаженої залізничної колії голландської залізничної мережі. Отримані результати ілюструють практичність і ефективність запропонованого підходу, але не враховують вплив інших засобів транспорту і елементів інфраструктури залізниць.

У китайській стратегії розвитку [4] застосовуються 24 потенційні критичні ризики в залізничній сфері, поділені на шість груп. Одним із методів визначення безпеки є анкетування, спрямоване на збір даних про ймовірності виникнення ризику і його вплив; цей же метод використаний у

роботі [5]. Інший метод для оцінювання критичних ризиків у залізничній сфері, наведений у роботі [4], заснований на нечіткому аналізі чутливості як критерію їхньої ідентифікації.

Управління ризиками на залізницях Австрії з методологічною управлінською основою наведено в роботі [6], де показано, що зниження ризиків при прийнятті рішень можливо на трьох рівнях, причому кожному рівню характерні багатогалузеві партнерства. Недоліком такої системи оцінювання є її громіздкість.

У рамках процесів прийняття рішень і прогнозування періодичних вимог до технічного обслуговування засобів транспорту при експлуатації залізниць Великобританії [7] прийнято, що вплив на безпеку руху можливий за допомогою концепції управління ризиками та активами. Практичного застосування розробок у роботі не наведено.

Для зниження ризиків у роботі [8] запропонована методика аналізу дерева часових помилок, за допомогою якого можуть бути визначені несправності засобів транспорту і час, необхідний на усунення несправностей і виконання технічного обслуговування для запобігання аварій. У цій роботі не враховано вплив людського фактора тощо.

Структура управління ризиками запропонована в роботі [9], яка служить для усунення причин аварій, що включає ідентифікацію небезпеки, аналіз ризику, оцінювання, обробку та контроль. Недоліком такої системи є довга тривалість прийняття рішень.

У роботі [10] розглянуто системи електропостачання залізниць як критичні для безпеки транспортної системи та обґрунтовано таку пропозицію при використанні аналізу ризиків на підставі стандарту ІЕС 61508. Моделювання системи безпеки засноване на ланцюгах Маркова. Недоліком такої позиції є неврахування інших систем інфраструктури залізниць.

Виконаний аналіз ризиків у роботі [11] призвів до рішення використання стохастичних, а не детермінованих способів для оцінювання безпеки руху, ґрунтуючись, тим не менш, на економічних показниках втрат. У роботі показані можливості переходу до залізничної системи методів аналізу ризиків, які використовуються на сьогодні для інших транспортних і технологічних систем, але не наведена реалізація такого переходу.

У роботі [12] подано методи оцінювання ризиків і можливості їхнього зниження при проектуванні, експлуатації та технічному обслуговуванні засобів транспорту залізниць. Особливу увагу приділено конструкції вантажних вагонів і її впливу на безпеку руху. Недоліком цієї роботи є неврахування інших систем і засобів інфраструктури залізниць.

У роботах [13, 14] запропоновано методи оцінювання ризиків за статистичною інформацією і використанням теорії ймовірності. Теоретично доведено зменшення ризиків на залізничному транспорті і запропоновано заходи до подальшого використання. Проте не надано опису як ці методики застосувати на практиці залізничного транспорту.

Безпека руху поїздів у роботі [15] характеризується кількісним оцінюванням людських помилок з вибором байєсової мережі для вивчення наслідків виявлених помилок. Байєсова мережа використовується для моделювання небезпечних подій, ризиків і кількісного аналізу безпеки руху поїздів. Однак технічний стан інфраструктури залізниці та його вплив на безпеку руху не враховується.

На українських залізницях [16-19] для оцінювання стану безпеки руху поїздів застосовують абсолютні та питомі показники. Як абсолютні показники використовують статистичні дані: кількість транспортних подій і постраждалих осіб, які загинули або були травмовані, а як питомі – похідні від статистичних даних.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою роботи є дослідження впливу вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів на зниження ризиків відмов. Для цього необхідно виконати такі завдання:

- обґрунтувати застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів для зниження ризиків відмов;
- виконати експериментальні дослідження зниження ризиків відмов при застосуванні вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів;
- розрахувати економічний ефект при застосуванні вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів під час проведення технічного обслуговування і ремонту.

**Основна частина дослідження.** Ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів є значущими в контексті безпеки та ефективності залізничного транспорту. Ризики – це можливі негативні події чи ситуації, які можуть виникнути і призвести до небажаних наслідків або втрат. У контексті вантажних вагонів ризики відмов буксових вузлів вказують на ймовірність технічних проблем або несправностей у їхній роботі, що може призвести до збитків, аварій або інших негативних наслідків для ефективності та безпеки залізничного транспорту.

До основних факторів, які спричиняють відмови буксових вузлів, можуть бути включені:

- несправності внаслідок експлуатації: інтенсивна експлуатація, неправильне завантаження вагонів, агресивне середовище шляху тощо;
- неякісний ремонт і технічне обслуговування без дотримання вимог щодо якості;
- знос і старіння матеріалів;
- низькоефективна діагностика: відсутність або недостатня ефективність систем діагностики перед ремонтом і обслуговуванням може призвести до невиявлення потенційних проблем;

- вплив зовнішніх факторів: атмосферні умови, температурні зміни, агресивні середовища;

- пошкодження внаслідок аварій: транспортні події, аварії та непередбачені обставини;

- людський фактор: неналежна підготовка та дії персоналу під час технічного обслуговування та ремонту.

Слід зазначити, що найбільше відмов припадає саме на людський фактор. Тому позначимо виконання завдання працівником з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів як  $x$ , а всіх інших елементів як  $y$ . Відомо, що працівник може виконати завдання правильно або ж неправильно. Тобто виконувані ними завдання неправильно – це будуть помилки, що з'являються в певній технологічній ситуації.

Запишемо формулу ймовірності успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів:

$$P_s = P_x(1 - P_h)P_y, \quad (1)$$

де  $P_x$  – ймовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів;

$P_h$  – ймовірність допущеної помилки в результаті дії людського фактора;

$P_y$  – ймовірність успішного виконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів.

Формулу ймовірності невиконання поставленого завдання з технічного обслуговування і ремонту буксових вузлів вантажних вагонів, яка буде відповідати ризикам відмов, запишемо в такому вигляді:

$$R = P_F = 1 - P_x(1 - P_h)P_y. \quad (2)$$

З формул (1), (2) можна зробити висновок про єдиний спосіб виконання комплексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів, що полягає в успішному виконанні завдань  $x$ ,  $y$  і зниженні дії людського фактора.

Ймовірність успішного виконання комплексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів була позначена через  $P_y$ , але доповнимо її залежністю від часу  $P(t)$ . Останній показник має такі властивості:

-  $P(t) = 1$  – успішне виконання комплексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів;

-  $P(t)$  – незростаюча функція часу;

-  $\lim_{t \rightarrow \infty} P(t) = 0$  – невиконання ком-

плексного завдання з технічного обслуговування і ремонту вантажних вагонів.

На підставі наведеного вище для опису ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів будемо вважати, що розподіл успішного виконання комплексного завдання є нормальним. Для зменшення кількості відмов буксових вузлів вантажних вагонів з причин проведення неякісного ремонту і технічного обслуговування можуть бути застосовані методи і засоби діагностики. Тому в роботі для діагностики буксових вузлів вантажних вагонів пропонується використовувати їхні вібраційні характеристики. Причому для виключення дії людського фактора пропонується повністю виключити вплив оператора на висновки діагностичного процесу. У зв'язку з цим ризик відмов буксових вузлів вантажних вагонів (вираз (2)) з урахуванням застосування вібраційної діагностики ( $P_h = 0$ ) буде розраховуватися за формулою

$$R = 1 - P_x P_y. \quad (3)$$

З огляду на наведені залежності ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів [20] можна стверджувати, що застосування вібродіагностики під час технічного обслуговування і ремонту дає змогу знизити величину ризиків у 2...4,5 рази при успішному виконанні поставленого завдання.

У роботі [21] доведено, що оскільки найменшим ризик, який може виникнути в процесі експлуатації вантажних вагонів після виконання відповідних технічного обслуговування і ремонту буксового вузла, є при використанні методу вібродіагностики, то цей метод діагностування запропоновано до впровадження у ВЧДР та ВЧДЕ на Придніпровській залізниці. Стенд діагностування за віброакустичними параметрами впроваджено у ВЧДР Батурицьке. Далі були виконані експериментальні дослідження, під час яких встановлено таке:

- кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій на час дослідження (початок 2017 – кінець 2019 року) становила 12 подій з вини ВЧДР Батурицька; загальна кількість відмов склала 32 події;

- ризик, що припадає на відмови буксових вузлів вантажних вагонів, що призвели до транспортних подій, становить

$$R = \frac{12}{32} = 0,375.$$

При використанні методу вібродіагностики у ВЧДР Батурицька Придніпровської залізниці при проведенні технічного обслуговування та ремонту кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів знизилась і становила чотири випадки (кінець 2020 року), а загальна кількість відмов становила 27 випадків.

Загальний ризик, що припадає на відмови буксових вузлів вантажних вагонів, які можуть призвести до транспортних подій, становить

$$R = \frac{4}{27} = 0,148.$$

Порівняння було зроблено виходячи з приблизно однакової кількості відремонтованих вагонів у ВЧДР Батурицька Придніпровської залізниці у 2019 і 2020 рр. Крім того, вантажообіг Придніпровською залізницею у 2020 році був вищий на 17 % порівняно з 2019 роком. Тому наведена вище вартість ризиків є адекватною.

Також були отримані дані у ВЧДР Батурицька Придніпровської залізниці за 2019 і 2020 роки про відмови буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології технічного обслуговування та ремонту і з застосуванням вібродіагностики. Кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, що припадає на 10 вагонів у ВЧДР Батурицька Придніпровської залізниці за 2019-2020 роки, наведено в таблиці.

Таблиця

Кількість відмов буксових вузлів вантажних вагонів, що припадає на 10 вагонів у ВЧДР Батурицька Придніпровської залізниці за 2019-2020 роки

Назва	Імовірність успішного виконання поставленого завдання $P_x$					
	0,0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
Звичайна технологія технічного обслуговування та ремонту	10	9	8	6,5	6	5
Технологія технічного обслуговування та ремонту з застосуванням вібродіагностики	10	8	6	4,5	3	1

За результатами виконаних розрахунків за формулою (3) на рис. 1 подано практичні результати розподілу ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології

технічного обслуговування та ремонту і з застосуванням вібродіагностики у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці впродовж 2019-2020 років.

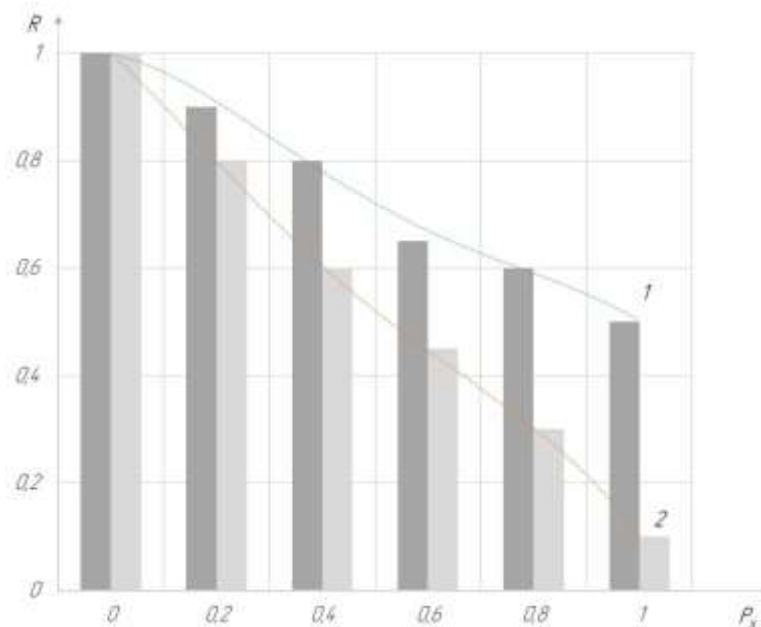


Рис. 1. Розподіл ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології технічного обслуговування та ремонту (1) і з застосуванням вібродіагностики (2) у ВЧДР Батуринська Придніпровської залізниці впродовж 2019-2020 років

З рис. 1 можемо бачити, що ризики відмов буксових вузлів вантажних вагонів при звичайній технології технічного обслуговування та ремонту порівняно з застосуванням вібродіагностики в 1,125...5,000 разів вищі. Це вказує на доцільність застосування при технічному обслуговуванні та ремонті буксових вузлів вантажних вагонів вібродіагностики, оскільки вона зменшує вплив людського фактора на технологічні процеси.

Крім того, наведені розподіли відмов букс вантажних вагонів при експлуатації за звичайною технологією технічного обслуговування і ремонту (1) і з застосуванням вібродіагностики (2) порівняно з теоретичними значеннями [21] мають відхилення в значеннях, які

становлять не більше 8 %. Це свідчить про прийнятний збіг теоретичних і експериментальних розрахунків ризиків, які трапилися внаслідок відмов буксових вузлів вантажних вагонів після технічного обслуговування та ремонту.

При використанні методу діагностування за віброакустичними діагностичними параметрами на Придніпровській залізниці при проведенні технічного обслуговування та ремонту буксових вузлів вантажних вагонів у процесі їхньої експлуатації можна визначити період безпечної експлуатації та прогнозувати відповідні економічні показники, що характеризують експлуатаційні та ремонтні витрати. Тобто на основі показника ризику відмов

буксових вузлів вантажних вагонів можна управляти безпекою руху, знижувати можливість виникнення небезпечних ситуацій на залізничному транспорті та контролювати якість усього перевізного

процесу. Скорочення витрат при зниженні кількості транспортних подій на залізничному транспорті через відмови буксових вузлів вантажних вагонів для деяких варіантів наведено на рис. 2.

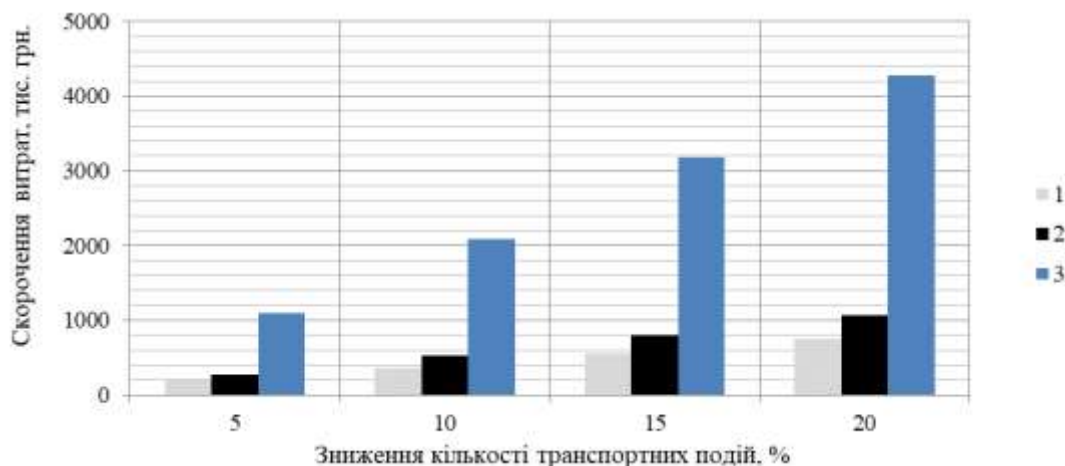


Рис. 2. Скорочення витрат при зниженні кількості транспортних подій на залізничному транспорті:

1 – на експлуатацію вагонів; 2 – ремонт вагонів; 3 – інфраструктуру залізниці

При прогнозуванні ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів за технічним станом після проведення технічного обслуговування чи ремонту для запобігання транспортним подіям можна також спрогнозувати економічний ефект від застосування вібродіагностики

буксових вузлів вантажних вагонів. Результати прогнозування економічного ефекту від застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів у ВЧДР Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці при їхньому відповідному пробігу наведено на рис. 3.

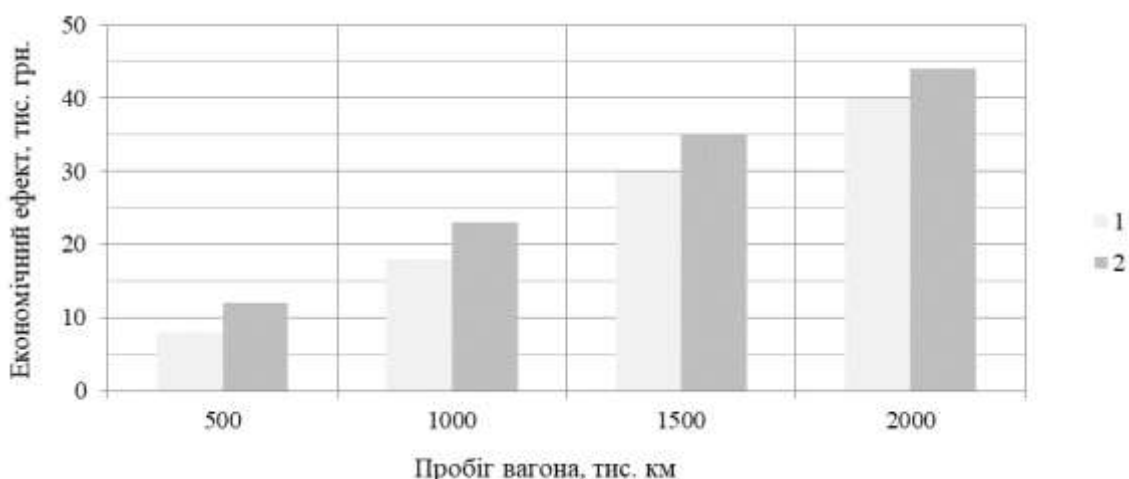


Рис. 3. Економічний ефект при відповідному пробігу вантажного вагона за запровадження вібродіагностики буксових вузлів під час проведення:

1 – технічного обслуговування; 2 – ремонту



Наведені результати вказують, що економічний ефект за запровадження вібродіагностики буксових вузлів під час проведення технічного обслуговування складає від 13 до 40 тис. грн, при ремонті – від 13 до 44 тис. грн для відповідного експлуатаційного пробігу вантажного вагона.

**Висновки.** У роботі обґрунтовано застосування вібродіагностики буксових вузлів вантажних вагонів для зниження ризиків відмов. У результаті виконаних експериментальних досліджень встановлено, що ризики на залізничному транспорті за застосування вібродіагностики буксового вузла вантажних вагонів знижуються в 2,5 раза.

За використання методу вібродіагностики у ВЧДР Нижньодніпровськ-Вузол Придніпровської залізниці під час проведення технічного обслуговування та ремонту кількість відмов буксових вузлів

вантажних вагонів знизилась і становила чотири випадки.

Практична цінність розробленого методу визначення ризиків, що виникають при відмовах буксових вузлів вантажних вагонів, полягає в можливості оцінювання безпеки залізничного транспорту. Крім того, для зниження ризиків, пов'язаних з відмовами буксових вузлів вантажних вагонів, було запропоновано використання вібродіагностики при технічному обслуговуванні та ремонті. У результаті отримано зниження ризиків відмов буксових вузлів вантажних вагонів у ВЧДР Батуринаська Придніпровської залізниці в 1,125...5,000 разів.

Установлено, що економічний ефект при застосуванні вібродіагностики буксових вузлів під час проведення технічного обслуговування складає від 13 до 40 тис. грн, при ремонті – від 13 до 44 тис. грн для відповідного експлуатаційного пробігу вантажного вагона.

### Список використаних джерел

1. Stažnik D. B., Bajor I. Identification and analysis of risks in transport chains. *Journal of Applied Engineering Science*. 414, 15(1), 2017. P. 61-70. doi:10.5937/jaes15-12179.
2. Ruud M. H. Rail Transport of Hazardous Substances from the Perspective of «All Hazard» Risk Management. *Chemical engineering transactions*. 48, 2016. P. 949-954. doi: 10.3303/CET1648159.
3. Jamshidi A. et al. A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment. *Risk Analysis*. 37(8), 2017. P. 1495-1507. doi:10.1111/risa.12836.
4. Jelena M., Andrić J. W., Ruoyu Z. Identifying the Critical Risks in Railway Projects Based on Fuzzy and Sensitivity Analysis: A Case Study of Belt and Road Projects. *Sustainability, MDPI*. 11(5), 2019. P. 1-18.
5. Patil M. et al. Ranking of risk in railway projects. *International journal of engineering sciences & research technology*. 6(6), 2017. P. 472-476. doi:10.5281/zenodo.814794.
6. Figueres E. M., Hughes P., Gulijk C. Big Data for Risk Analysis: the future of safe railways. *XII Congreso de ingeniería del transporte. 7, 8 y 9 de Junio, Valencia (España)*. Editorial Universitat Politècnica de València, 2016. P. 347-353. doi.org/10.4995/CIT2016.2016.1825.
7. Sasidharan M. et al. A Review of Risk Management Applications for Railways. *14th International Conference of Railway Engineering*. 2017. 15 p. doi:10.25084/raileng.2017.0065.
8. Smoczyński P., Kadziński A., Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of mechanical and transport engineering*. 68(4), 2016. P. 65-80. doi:10.21008/j.2449-920X.2016.68.4.06.
9. Pablo-Martí F., Santos J. S., Kaszowska J. An agent-based model of population dynamics for the European regions. *Emergence: Complexity and Organization*. 17(2), 2015. P. 18-24.

10. Otto A. et al. Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 33, 2019. P. 385-397. doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.025.
11. Bohus L. A General Model for Railway Systems Risk Assessment with the Use of Railway Accident Scenarios Analysis. *Procedia Engineering*. 187, 2017. P. 150-159. doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361.
12. Hadj-Mabrouk H. Contribution of Artificial Intelligence to Risk Assessment of Railway Accidents. *Urban Rail Transit*. 5(2), 2019. P. 104-122. doi.org/10.1007/s40864-019-0102-3.
13. Baranovskyi D., Muradian L., Bulakh M. The Method of Assessing Traffic Safety in Railway Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 042075, 2021. P. 1-6.
14. Bulakh M., Okorokov A., Baranovskyi D. Risk System and Railway Safety. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 042074, 2021. P. 1-7.
15. Peng Z., Lu Y., Miller A., Johnson C., Zhao T. Risk Assessment of Railway Transportation Systems using Timed Fault Trees. *Quality and Reliability Engineering*. 32, 2016. P. 181-194. doi:10.1002/qre.1738.
16. Мурадян Л. А. Відмови та безвідмовність вагонів як складові експлуатаційної надійності. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 52(1161), 2015. С. 127-130.
17. Гаврилюк В. І. Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах: монографія. Дніпро: ДНУЗТ, 2019. 282 с. ISBN 978-966-8471-89-6.
18. Равлюк В. Г. Визначення технічного стану буксових підшипників рухомого складу шляхом вібродіагностування. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2/7 (74), 2015. С. 11-15.
19. Рачинська А. В. Класифікація ризиків на залізничному транспорті як основа формування системи економічної безпеки його функціонування. *Економіка і суспільство*. 6, 2016. С. 81-87.
20. Myamlin S., Muradian L., Pitsenko I. Influence of Diagnostics of Axle Boxes of Freight Cars on Traffic Safety of the Railway Transport. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 666, 052051, 2021. P. 1-6. doi:10.1088/1755-1315/666/5/052051.
21. Muradian L., Pitsenko I., Shaposhnyk V., Shvets A., Shvets A. Predictive model of risks in railroad transport when diagnosing axle boxes of freight wagons. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 237(4), 2023. P. 528-532. doi:10.1177/09544097221122043.

---

Піценко Ірина Віталіївна, аспірантка кафедри вагонів та вагонного господарства, Український державний університет науки та технологій. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5674-0337>. Тел.: +380964122426. E-mail: irinapit95@gmail.com.

Pitsenko Iryna Vitaliyivna, PhD student, Department of Railway cars, Ukrainian State University of Science and Technology. ORCID <https://orcid.org/0000-0002-5674-0337>. Tel.: +380964122426. Email: irinapit95@gmail.com.

Статтю прийнято 10.12.2023 р.

**ЗБІРНИК НАУКОВИХ ПРАЦЬ УКРАЇНСЬКОГО  
ДЕРЖАВНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО  
ТРАНСПОРТУ**

**COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE  
UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

*Випуск 206*

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що внесені до Переліку наукових фахових видань України, у яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 15.10.2019 р. № 1301).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу.  
Усі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Кальченко С. А.

Редактор Ібрагімова Н. В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 11.12.2023 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн. друк. арк. 11,25. Тираж 50. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Феєрбаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.