



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

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

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**ДО 100-РІЧЧЯ О. П. МЧЕДЛОВА-ПЕТРОСЯНА**

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

*Випуск 171*

**Харків 2017**

## УДК 656.2(062)

У Збірнику наукових праць УкрДУЗТ відображені матеріали та наукові розробки вчених і спеціалістів залізничного транспорту, наукових установ і промисловості з вирішення сучасних задач та проблем організації перевезень та управління на транспорті, рухомого складу і тяги поїздів, транспортного будівництва та залізничної колії, автоматики, телемеханіки та зв'язку.

Збірник наукових праць УкрДУЗТ призначений для інженерно-технічних працівників, магістрантів, студентів і науковців залізничного транспорту та промисловості.

З електронною версією збірника можна ознайомитися на сайті: [http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis\\_nbuv/cgiirbis\\_64.exe](http://www.irbis-nbuv.gov.ua/cgi-bin/irbis_nbuv/cgiirbis_64.exe).

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:** <http://znp.kart.edu.ua>

### Реферативна база

"Наукова періодика України": <http://csw.kart.edu.ua>

**ISSN (p) 1994-7852**

**ISSN (online) 2413-3795**

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Друкується за рішенням вченої ради університету, протокол № 6 від 13 вересня 2017 р.

Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. №1328 (додаток 8)).

### Редакційна колегія

Головний редактор – Михалків Сергій Васильович, кандидат технічних наук, доцент, УкрДУЗТ

Бабаєв М.М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Бойнік А.Б., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Бутько Т.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Ватуля Г.Л., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ  
Вовк Р.В., д.фіз.-мат.н., професор, УкрДУЗТ  
Воронін С.В., д.т.н., доцент, УкрДУЗТ  
Ворожбіян М.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Даренський О.М., д.т.н., професор,  
УкрДУЗТ  
Каграманян А.О., к.т.н., доцент, УкрДУЗТ  
Лаврухін О.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Ломотько Д.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

Мартинов І.Е., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Мойсеєнко В.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Мороз В.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Огар О.М., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Панченко С.В., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Приходько С.І., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Плугін А.А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Тартаковський Е.Д., д.т.н., професор,  
УкрДУЗТ  
Тимофеева Л.А., д.т.н., професор, УкрДУЗТ  
Фалендиш А.П., д.т.н., професор, УкрДУЗТ

ISSN 1994-7852

Зареєстровано 2 червня 2007 р.  
у ISSN International Centre 20, Rue  
Bachaumont, 75002 PAFIS, FRANCE

© Український державний університет  
залізничного транспорту, 2017

**ЗМІСТ**

<i>Плугін А. М., Плугін А. А.</i> До 100-річчя О. П. МЧЕДЛОВА-ПЕТРОСЯНА	4
<i>Ушеров-Маршак А. В.</i> Тринадцятий аспірант школи МЧЕДЛОВА-ПЕТРОСЯНА	12
<i>Фишер Х.-Б.</i> Вспоминая Отара Петровича	15
<i>Плугін А. А., Лютий В. А., Савчук Ю.Ю.</i> Дослідження впливу комплексної хімічної добавки, що забезпечує проникну дію, на фізико-механічні властивості ремонтної композиції на основі шлаколузного в'язучого	19
<i>Вінниченко В. І., Буцький В. О., Костюк Т. О., Плугін А. А., Брайцев Д.</i> Вплив фосфогіпсу на активність шлакового в'язучого	30
<i>Плугін А. А., Фишер Х.-Б., Борзяк О. С., Єфіменко А. С., Жигло А.А.</i> Підвищення міцності та водостійкості гіпсових в'язучих нанодисперстними мінеральними добавками	37
<i>Трикоз Л. В., Борзяк О. С., Савчук В. Ю.</i> Дослідження взаємодій компонентів глиновмісних матеріалів методом інфрачервоної спектроскопії	44
<i>Плугін А. А., Плугін О. А., Касьянов В. В., Конєв В. В., Плугин Д. А.</i> Дослідження заземлених екранів із електропровідних композицій як способу захисту від електрокорозії	53
<i>Бабич Є. М., Ромашко В.М.</i> Особливості розрахунку косозавантажених елементів з використанням діаграм їх стану «момент-кривина»	62
<i>Гасій Г. М.</i> Скінченно-елементний аналіз НДС вузла з'єднання елементів верхнього пояса структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції	69
<i>Дацун Ю. М.</i> Методи формування віртуальних виробництв з ремонту локомотивів	76

## ДО 100-РІЧЧЯ О. П. МЧЕДЛОВА-ПЕТРОСЯНА



### **МЧЕДЛОВ-ПЕТРОСЯН Отар Петрович** (3.10.1917– 3.10.1997)

завідувач кафедри будівельних матеріалів ХІПТу  
у 1955–1976 рр.,

доктор технічних наук, професор,  
член-кореспондент Академії наук Грузії,  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки,  
лауреат премії Академії наук СРСР  
ім. академіка М. С. Курнакова,  
заслужений діяч науки України,  
заслужений винахідник України,  
Почесний залізничник

3 жовтня 2017 р. виповнилось 100 років засновнику і першому та беззмінному протягом 21 року завідувачу кафедри будівельних матеріалів університету (тоді ще ХІПТу) Отару Петровичу Мчедлову-Петросяну – видатному вченому і педагогу ХХ століття, одному із основоположників радянської та української наукових шкіл фізичної хімії неорганічних будівельних матеріалів.

#### *Основні дати життя та діяльності*

#### **О. П. Мчедлова-Петросяна:**

- народився 3.10.1917 у м. Тбілісі, Грузія;

- 1926–28 – мешкав у Німеччині, досконало вивчив німецьку мову;

- 1935–40 – студент хіміко-технологічного факультету Грузинського політехнічного інституту, спеціальність – «Технологія силікатів»;

- 1941–47 – лаборант, аспірант, з 1946 – асистент кафедри технології силікатів і заступник декана хіміко-технологічного

факультету Грузинського політехнічного інституту;

- 1946 – захистив дисертацію на тему «Дослідження реакції сульфат барію + глинозем і одержання вогнетривкого цементу» в Грузинському політехнічному інституті та здобув науковий ступінь кандидата технічних наук за спеціальністю «Технологія силікатів»;

- 1947–52 – старший науковий співробітник лабораторії вогнетривів інституту металу та гірської справи Академії наук Грузинської РСР;

- 1952–76 – старший викладач, доцент, професор кафедри «Будівельні роботи та конструкції», з 1954 – завідувач кафедри «Будівельні матеріали» Харківського інституту інженерів залізничного транспорту ім. С. М. Кірова (ХІПТу);

- 1953 – захистив дисертацію на тему «Фізико-хімічні властивості серпентиніту та одержання в'язучих та вогнетривів на

його основі» в Інституті фізичної хімії Академії наук СРСР та здобув науковий ступінь доктора технічних наук за спеціальністю «Технологія силікатів»;

- 1957÷63 – член-кореспондент Академії будівництва та архітектури Української РСР (до її ліквідації);

- 1957 – організував лабораторію гідротехнічного бетону в науково-дослідному і проектному інституті УкрВОДГЕО;

- 1960 – організував лабораторію фізикохімії та корозії бетону в науково-дослідному та проектному інституті УкрВОДГЕО;



О. П. Мчедлов-Петросян (праворуч) з академіком П. О. Ребіндером (1959)

- 1962 – видавництвом «Госстройиздат» видано монографію «Термодинаміка силікатів» (у співавторстві з В. І. Бабушкіним і Г. М. Матвеевим, перевидано у 1965, 1972, 1986 рр.);

- 1964 – організував і очолив лабораторію фізико-хімічних досліджень у Державному всесоюзному інституті з проектних і науково-дослідних робіт «Південдіпроцемент» Міністерства промисловості будівельних матеріалів СРСР;

- 1965 – організував галузеву науково-дослідну лабораторію залізобетонних шпал

Міністерства шляхів сполучення СРСР в ХІПті;

- 1965 – удостоєний почесного звання «Заслужений винахідник УРСР»;

- 1968 – учасник V Міжнародного конгресу з хімії цементу (м. Токіо);

- 1971 – видавництвом «Стройиздат» видано монографію «Хімія неорганічних будівельних матеріалів» (другу редакцію видано у 1988 р.);

- 1974 – Генеральний секретар VI Міжнародного конгресу з хімії цементу (м. Москва);



О. П. Мчедлов-Петросян з учнями в ХІІТі у 1962 р.  
Справа наліво стоять:  
О. В. Ушеров-Маршак,  
Д. О. Угінчус,  
П. О. Мельниченко,  
В. С. Софронов

- 1974 – обраний член-кореспондентом Академії наук Грузинської РСР;  
- 1976–97 – завідувач кафедри, з 1991 – професор кафедри «Фізико-хімічна механіка і технологія бетону» Харківського інженерно-будівельного інституту (ХІБІ, в теперішній час ХНУБА);  
- 1976 – організував та очолив навчально-науково-виробничий фізико-хімічний центр ХІБІ – Південдіпроцемент – Харківський домобудівний комбінат № 1;  
- 1977 – організував та очолив галузеву науково-дослідну лабораторію розроблення та дослідження ефективних будівельних матеріалів Міністерства промисловості будівельних матеріалів УРСР у ХІБІ;  
- 1978 – удостоєний почесного звання «Заслужений діяч науки УРСР»;

- 1980 – Віце-президент наукового комітету VII Міжнародного конгресу з хімії цементу (м. Париж);  
- 1985 – удостоєний премії Академії наук СРСР ім. академіка М. С. Курнакова за серію робіт «Термокінетичний аналіз неорганічних будівельних матеріалів»;  
- 1986 – член оргкомітету VIII Міжнародного конгресу з хімії цементу (м. Ріо-де-Жанейро);  
- 1993 – удостоєний Державної премії України за цикл робіт «Термодинамічні та термокінетичні основи будівельного матеріалознавства»;  
- 1997 – видано збірник поезій О. П. Мchedlova-Петросяна «На ситах пам'яті».



О. П. Мchedlov-Петросяна – видатний учений зі світовим ім'ям, засновник великої наукової школи в галузі теорії і технології цементу і бетону. Він сформував і разом зі своїми численними учнями протягом усієї своєї діяльності розвивав виключно важливий і дотепер науковий напрямок – прикладання фізичної хімії до завдань матеріалознавства.

Основні напрямки наукової діяльності О. П. Мchedlova-Петросяна: теорія і методи будівельного матеріалознавства; термодинаміка та кінетика реакцій у

системах технічних силікатів; хімія та фізична хімія неорганічних будівельних матеріалів; фізико-хімічна механіка в'язучих речовин, матеріалів і виробів на їх основі; кероване структуроутворення в технології будівельних матеріалів та виробів; корозія бетону та протикорозійний захист будівельних конструкцій.

Творча спадщина О. П. Мchedlova-Петросяна – понад 500 наукових праць, у тому числі 12 монографій, 76 авторських свідоцтв і патентів. Монографія «Термодинаміка силікатів» (співавтори –

В. І. Бабушкін і Г. М. Матвеев) витримала 9 видань: 4 – російською (у 1962, 1965, 1972 і 1986 рр.), 3 – німецькою (у 1965, 1966 і 1985 рр.), по 1 – англійською (у 1985 р.) і китайською мовами.

О. П. Мchedlov-Петросян створив велику широко відому наукову школу. Він підготував 94 кандидати наук: Гогичева Х. І. (захистила дисертацію у 1953 р.), Бунаков О. Г. (1958), Бабушкін В. І. (1960), Воробйов Ю.Л., Говоров О. О. (1961), Латишев Ф. А. (1962), Філатов Л. Г., Дюженко М. Г. (1963), Софронов В. С., Мельниченко П. О., Салоп Г. А. (1964), Угінчус Д. О., Ушеров-Маршак О. В., Шифрін В. Б. (1965), Папкина Л. П., Мокрицька Л. П., Старосельський О. О., Сиренко П. А., Бершадський Ф. Г., Шевченко Л. П., Чернявський В. Л. (1966), Питерський А. М., Степаненко М. Г., Сидорович Я. Й., Ольховий Л. Г. (1967), Токарев М. С., Коган М. А., Ладигенський В.М., Улітіна Г.О., Вандоловський О.Г., Шеїн В.І., Зазімко В. Г., Жильцов В. П. (1968), Ситник Л.В., Холодний О.Г., Ольгінський О.Г. (1969), Бабиченко В. Я., Пługін А. М., Наконечний А. С. (1970), Подоба А. В., Меліхов В. І., Рифман Л. Б., Басдикян І. Х., Калениченко Л.М., Аргунова Л.І., Воляк П.М. Дмитрієв І. Б., Кириченко Д. В. (1971), Кузнецов С. Н. (1972), Наникошвілі В. Г., Лібенко Ю.П., Бородинов В.К., Волков Є.І. (1973), Щоткіна Т. І., Подвигін О. І. (1974), Шматкова Р. І., Заворін Л. В., Кутах О. П., Сівцов О. П. (1975), Красулова Н. М., Петров О. А., Савенков В. В. (1976), Дубницький В. Ю., Валявський В. І. (1977), Муха А.Г. (1978), Сельник А.М., Спирін Ю.О., Селіванов І. І. (1980), Авалова Е. В., Гриньова І. В., Іманова О. М., Гусейнова І.А. (1981), Болдова Л. Г., Месрапян Н. В., Сапожнікова Н. І. (1982), Братчиков В. Г. (1983), Теленік С.С. (1984), Алексеєнко Л.Н., Боровська І. В., Ніколаєв А. П. (1985), Гасвий Ю. А. (1986), Ціак М. Я. (Польща, 1986), Серіков Я. А., Коробов А. І., Мелкадзе О. Ф., Виродов В. І. (1987), Теймурова С. Х. (1989), Єнч Ю. Г. (1990),

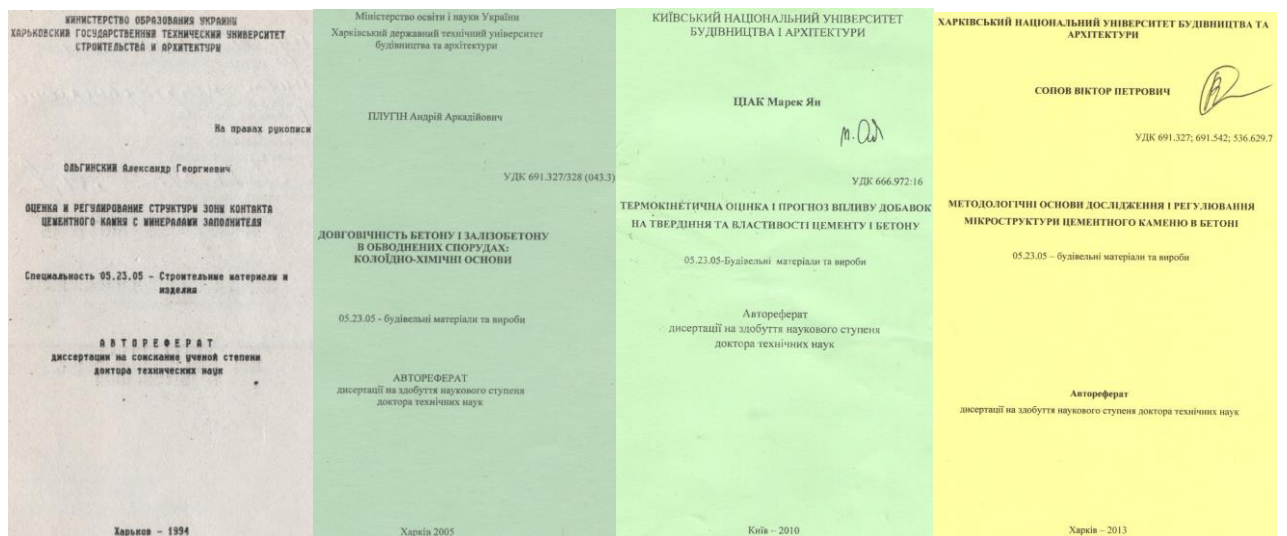
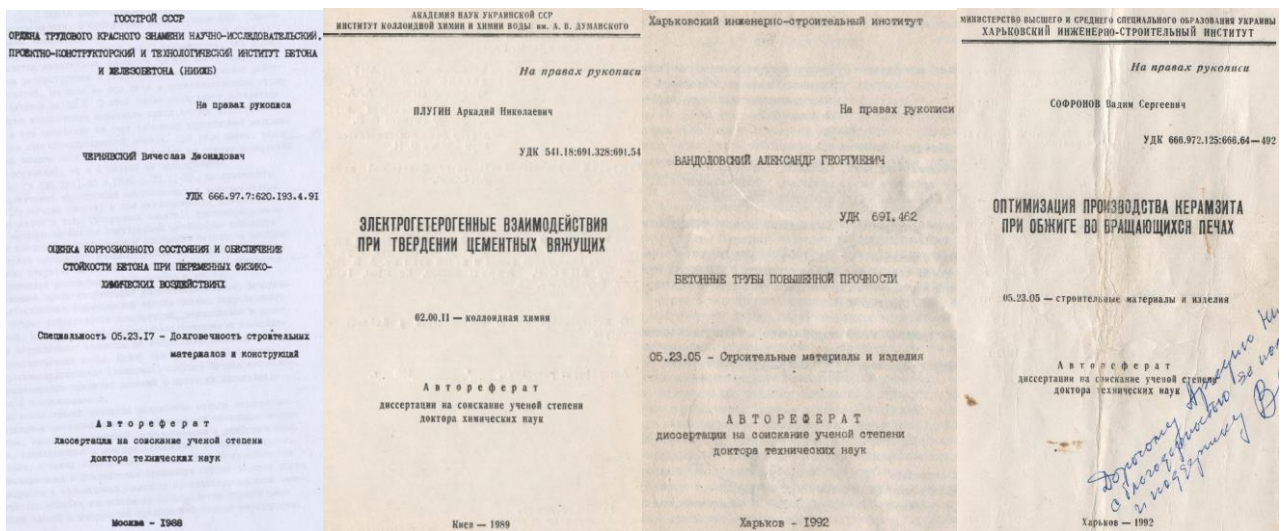
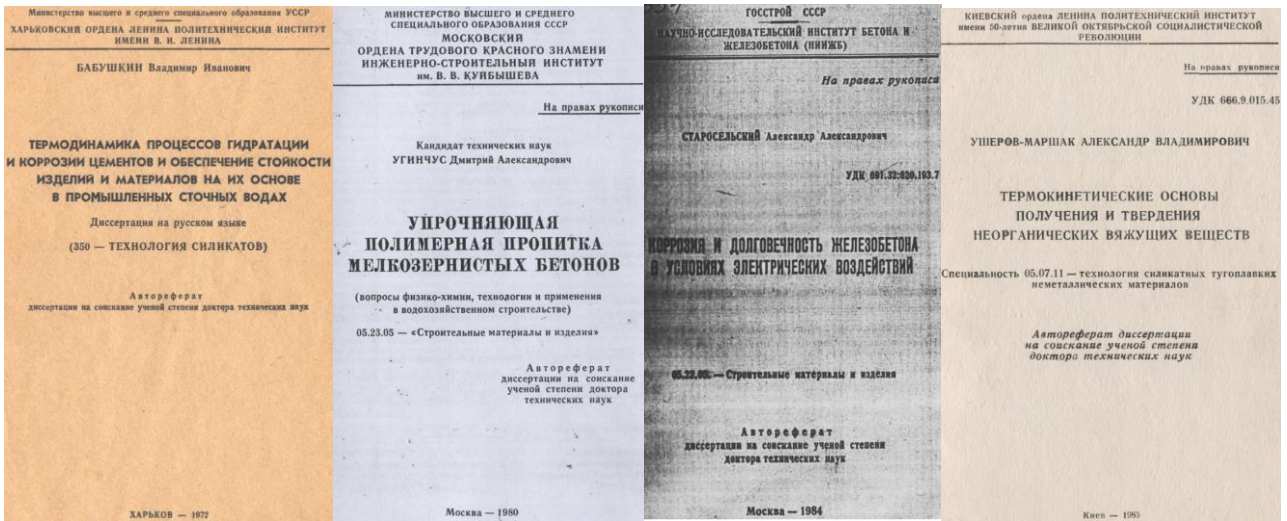
Свідерек К. (Польща, 1992), Соселія Д.Т. (1992), Бетрахмадов Р. В. (1993), Івасішина О.М. (1994), Дейсадзе К. Д. (1995).

Із учнів О. П. Мchedlov-Петросяна 17 стали докторами наук: Бабушкін В. І. (1972), Воронов В. Г. (1973), Фаталієв С. А., Угінчус Д. О. (1980), Зазімко В. Г. (1984), Старосельський О. О. (1984), Ушеров-Маршак О. В. (1985), Дюженко М. Г. (1986), Чернявський В. Л. (1988), Філатов Л. Г. (1989), Пługін А. М. (1989), Софронов В. С. (1992), Вандоловський О. Г. (1992), Ольгінський О. Г. (1994), Кутах О. П. (2008), Ціак М. Я. (Польща, 2010), Бабиченко В. Я. (2011).

Стали докторами наук представники вже й 2-го покоління учнів школи О. П. Мchedlov-Петросяна – Пługін А. А. (2005), Сопов В. П. (2013), Пługін Д. А. (2014), Костюк Т. О. (2015), Трикоз Л. В. (2015).

Учні О. П. Мchedlov-Петросяна розвинули важливі напрямки фізичної хімії будівельних матеріалів, деякі з них стали засновниками нових наукових напрямків і шкіл: хімічна термодинаміка одержання і корозії силікатних матеріалів (д.т.н., проф. Бабушкін В. І.); термокінетика твердіння мінеральних в'язучих (д.т.н., проф. Ушеров-Маршак О. В.); колоїдна хімія в'язучих, фізико-хімічна механіка бетонів і конструкцій із них (д.х.н., проф. Пługін А.М.); електрохімія корозії залізобетону (д.т.н., проф. Старосельський О. О.); корозія, адаптація, довговічність цементного бетону (д.т.н., проф. Чернявський В. Л.); явища у зонах контакту цементного каменю і заповнювачів (д.т.н., проф. Ольгінський О. Г.); самовільні деформації цементного каменю, безусадкові та розширні цемента (д.т.н., проф. Філатов Л. Г.); пресування цементних бетонів (д.т.н., проф. Вандоловський О. Г.); набризк цементних бетонів (д.т.н., проф. Дюженко М. Г.); просочення бетонів полімерами (д.т.н., проф. Угінчус Д. О.); виробництво теплоізоляційних матеріалів із кераміки та мінеральних розплавів (д.т.н., проф. Софронов В. С.).





Педагогічна діяльність О. П. Мchedlova-Петросяна була пов'язана в основному з ХІПТом та ХІБІ-ХНУБА, сотні випускників яких пишаються тим, що слухали його лекції, пам'ятають його як надзвичайно цікаву людину і високоєрудованого педагога. Його науково-педагогічна діяльність високо була оцінена також і за кордоном. Він виступав з лекціями німецькою мовою перед студентами та аспірантами Дрезденського технічного університету, Веймарського та Котбуського будівельних інститутів, Ієнського університету (Німеччина), а також Краківської гірничо-металургійної академії (Польща), університетів

Угорщини, Франції, Бразилії. У 1996 р. О. П. Мchedlovу-Петросяну було присвоєно звання професора фонду Сороса.

Крім наукової і педагогічної діяльності, Отар Петрович захоплювався поезією, сам писав вірші, у 1959 р. був представлений Анні Ахматовій, читав їй свої вірші. Захоплювався також філателією.

У теперішній час учні Отара Петровича та учні його учнів продовжують його справу.

Для підготування цього матеріалу застосовано джерела [1–5], архівні матеріали кафедри БМКС, спогади учнів О. П. Мchedlova-Петросяна.

### *Список використаних джерел*

1. Мchedlov-Петросян, О. П. На ситах памяти [Текст] / О. П. Мchedlov-Петросян. – Харьков: Фолио, 1997. – 57 с.
2. Неслучайное [Текст]: стихи и эпиграммы из А. В. Ушерова-Маршака. – Харьков, 1997. – 43 с.
3. Ушеров-Маршак, А. В. Феномен Отара Петровича [Текст] / А. В. Ушеров-Маршак // Физико-химические проблемы строительного материаловедения: материалы научных чтений, посвященных памяти О.П. Мchedlova-Петросяна. – Харьков: ХГТУСА, 1998. – С. 3-6.
4. Мchedlov-Петросян, Н. О. Отар Петрович Мchedlov-Петросян (Краткий очерк профессиональной деятельности) [Текст] / Н. О. Мchedlov-Петросян // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА; ХОТВ АБУ, 2007. – С.6–11.
5. Ушеров-Маршак, А. Мои бетонные университеты. Записки технолога [Текст] / А. Ушеров-Маршак. – Харьков: Форт, 2013. – 144 с.

*Почесний професор УкрДУЗТ,  
лауреат Державної премії України  
в галузі науки і техніки,  
д.х.н., проф. А. М. Плуґін*

*Зав. кафедри будівельних матеріалів,  
конструкцій та споруд УкрДУЗТ,  
д.т.н., проф. А. А. Плуґін*

Уже себя не мыслю я без Харькова  
В любимой и большой моей стране,  
И шумного, и пыльного, и жаркого,  
Но близкого и дорогого мне.

Здесь замыслы мои пришли к свершению,  
Здесь я учил и научился жить.  
И здесь меня проверили сомнения,  
К чему стремиться и кого любить.

И если величавей и красивее  
Есть города, и в них бывать я рад,  
Ты, сделавший мудрее и счастливее  
Меня, мне дорог точно старший брат.

*О. П. Мчедлов-Петросян*

Украины и Грузии сын,  
Патриарх ты давно по праву.  
Я не украинец и не грузин,  
Но знаю тебя на славу.

В науке ты – словно икона  
И нет тебя, вроде, святей.  
Так надо ж – суметь из бетона  
Слепить почти сотню детей!

*А. В. Ушеров-Маршак*

## ТРИНАДЦАТЫЙ АСПИРАНТ ШКОЛЫ МЧЕДЛОВА-ПЕТРОСЯНА

*Это было недавно,  
это было давно...*

Далеко не в первый раз я пишу об Отаре Петровиче. Юбилейные, и не только, даты и события в развитии науки о строительных материалах, в том числе о цементе и бетоне, как бы определяют характерные рубежи воспоминаний о 60 годах моей судьбы, неразрывно связанной с именем Учителя.

Итак, 1957 год. Третий курс строительного факультета в Alma Mater – ХИИТе. Конец не очень удачной для меня зимней сессии. Тройка по строительным материалам! Не смог убедить принимавшего экзамен ассистента в ненужности изображения разреза структуры древесины под микроскопом. Помните – луб, камбий... Тем удивительнее было получить приглашение молодого интеллигентного зав. кафедрой в студенческий научный кружок.

На кафедре, тоже молодой, царила обстановка меблирования квартиры новой мебелью, то бишь новыми приборами и оборудованием. Первый в отрасли пирометр Курнакова собственного изготовления для термического анализа, первый конический пластомер, первые измерители тонкости помола цемента и т. д. В числе технологических новинок – вибротельница. Ожидалось, по мнению академика П. А. Ребиндера, что агрегат станет своеобразной технологической панацеей.

Эксперимент по «оживлению» слежавшегося в мешках цемента методом вибродомола поручили студентам. Одним из них был я. Мололи партиями по 10-30 минут. Все ОК – удельная поверхность, сроки схватывания, нормальная густота, прочность цемента. При подготовке доклада на студенческую конференцию научный руководитель связал рост удельной поверхности цемента после

домола с термодинамическими величинами свободной энергии. Доклад принес двойной успех – грамоту горкома комсомола и, совершенно секретно, – четверку в зачетку. Это был мой старт в науку о строительных материалах.

А в стране строительный бум! Ориентация на всеобщую заводскую технологию сборного железобетона и крупнопанельное домостроение. Тысячи новых заводов ЖБИ и ДСК требовали – науку в практику. Кафедра непосредственно включается в этот процесс. Основы деятельности – физико-химическая направленность заведующего кафедрой, его контакты с непререкаемыми научными авторитетами страны – академиками П. А. Ребиндером, Н. В. Беловым, П. П. Будниковым. Редкое для тех времен владение Отаром Петровичем иностранными языками – ключ к зарубежной науке и практике. Первая, да и последующие, когорты учеников Отара Петровича – путейцы. Смело, но не безрассудно окунались они в физико-химию, по каплям разбавляя традиционный, описательный физико-механический подход к решению новых рецептурно-технологических задач.

На кафедре готовятся и защищаются кандидатские диссертации. В исследованиях осваиваются методы оптической и электронной микроскопии, рентгеновский анализ и дериватография. Становятся международно-признанными приоритетные труды по термодинамике силикатов. Доклады на международных конгрессах, симпозиумах и конференциях как бы подстегивают честолюбивых учеников формирующейся научной школы. Складываются особые, доверительные, а потому и честные отношения между учениками. Не секрет, что успехи в виде

новых кандидатов наук сопровождаются застольями, где я – неизменный тамада. Все вместе взятое сплачивает коллектив

единомышленников. Говорят, традиции не умирают...



Учитель и ученик  
(1964)

ХИИТовский участок моего жизненного пути в качестве студента и аспиранта стал определяющим. Под номером 13 я защитил кандидатскую диссертацию. Тема – комплексные добавки в бетоны ускоренного твердения. Все эксперименты и внедрение проводились на Харьковском ДСК № 1, лучшем в Союзе по научно-технологическому прогрессу.

Горжусь этим фактом. На ДСК № 1 организуется первая и единственная в стране научно-производственная метрологическая лаборатория. Первое в стране автоматизированное отделение добавок в бетон. Практически первые и

успешные попытки учета экзотермии бетона в заводской технологии ЖБИ. Все это способствовало формированию моих профессиональных навыков. Все это продолжается и по сей день уже для бетонов и технологий новых поколений.

А где же, спросите вы, Отар Петрович? Всегда рядом! Даже когда я ушел из возглавляемой им физико-химической лаборатории Южгипроцемента на ДСК с целью замены коммуналки на изолированную квартиру. Но ушел я из института вместе, не считите хвастовством, с первым в стране разработанным в Харькове дифференциальным изотерми-

ческим микрокалориметром. Все 8 лет моей работы на ДСК я стремился использовать прибор в технологических целях. Даже прокуратура однажды, по наводке «доброжелателя», поинтересовалась: «А что этот прибор меряет в лаборатории комбината?»

А потом и уже сорок лет тружусь я в одном из самых авторитетных строительных ВУЗов страны и за ее рубежами. Удалось вместе с Отаром Петровичем развить в теоретическом, экспериментальном, прикладном и образовательном направлениях калориметрию цемента и бетона, обосновать результативность термокинетических исследований, защитить докторскую, подготовить ряд докторов и кандидатов наук, получить высокую оценку своего труда в виде государственных наград.

Тесное многолетнее общение с учителем, наставником и просто сотрудником много дало в морально-этическом плане. Честность в науке – одно из таких качеств. Нынче, в условиях царящих признаков непрофессионализма, лженауки и диссертационного бизнеса я принял стратегическое для себя решение – неучастие в подобном...

С Отаром Петровичем нас сближала общность научных и человеческих взглядов в отношении истории, литературы и юмора. Оба сочиняли стихи. Ему очень нравились мои строчки:

*Спасибо ХИИТ, что ты дал мне когда-то  
Диплом инженера, диплом кандидата*

Вот и скажите в итоге – счастливая или нет цифра 13?

*Профессор кафедры физико-химической механики  
и технологии строительных материалов  
Харьковского национального университета  
строительства и архитектуры,  
заслуженный деятель науки и техники Украины,  
лауреат Государственной премии Украины  
в области науки и техники,  
лауреат премии Академии наук СССР  
им. академика Н. С. Курнакова  
д.т.н., проф. А. В. Ушеров-Маршак*

## ВСПОМИНАЯ ОТАРА ПЕТРОВИЧА

Отар Петрович Мчедлов-Петросян — выдающийся, мирового масштаба ученый-силикатчик прошлого столетия, научная школа которого известна во всём мире. За Науку ему благодарны около 100 учеников — докторов и кандидатов наук. Особое место в наследии ученого занимают термодинамические исследования. В Веймарском строительном университете на основе его методик и термодинамических данных детально описаны процессы твердения цементов, подтвержденные затем результатами электронной растровой микроскопии.

В своей жизни, особенно во время подготовки Международных конгрессов по строительным материалам «Ibausil», я часто вспоминаю встречи с Отаром Петровичем. В течение почти 30 лет он постоянно приезжал в Веймар, выступал с пленарными докладами. Даже за несколько дней до своего 80-летия, уже со слабым здоровьем он приехал к нам в Веймар в качестве почётного участника конференции. Это выступление в 1997 году перед многочисленной аудиторией стало символическим завершением его научной деятельности. Еще 2 октября 1997 года мы с ним созвонились, и я благодарил его за участие в конференции и связанные с этим заботы.

Познакомились мы с профессором Мчедловым-Петросяном в 1972 году в Харьковском институте инженеров железнодорожного транспорта. Я учился тогда в ХПИ (ныне Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»), поступив на специальность «Технология вяжущих веществ». Один профессор Веймарского университета попросил меня тогда передать небольшой сувенир и лучшие пожелания коллеге Отару Петровичу. Конечно, мне тогда пришлось передать в Веймар и дружеский ответ. В результате я познакомился с профессором Хеннингом,

моим будущим руководителем кандидатской диссертации. Таким образом, уже в 1970-е годы я был связующим звеном между Веймаром и Харьковом.

Знакомство с Отаром Петровичем дало мне очень много. Особенно вспоминаю вечера в его домашнем «офисе». Книги на полках от пола до потолка, маленький стульчик рядом с рабочим столом, на котором сидели аспиранты и докторанты не одного поколения. И я тут, рядом с Отаром Петровичем. Слушаю его слова и идеи по силикатным материалам, о взаимной пользе тесных контактов учёных, а также о подготовке Международных конгрессов по химии цемента. Я стал понимать его трудности как эксперта-силикатчика в транспортном, а не в строительном университете. Затем беседы по общим темам за чашкой чая. Чаще всего его очаровательная супруга готовила бутерброды со шпротами и лимоном, это были его любимые закуски с детских времен в Германии.

Часто встречи заканчивались цитированием стихов немецких поэтов. А какая интонация была у Отара Петровича! Удивительно, насколько хорошо можно владеть немецким языком. Больше всего из поэтов он уважал Рильке. Помню, как он с лукавым прищуром глаз оценивал самого себя: «Самый известный поэт среди силикатчиков и самый известный силикатчик среди поэтов».

Отрадно, что и сегодня я поддерживаю научные контакты с последователями его научной школы, в частности, с руководителем известного в Европе калориметрического центра профессором А. В. Ущеровым-Маршаком, заведующим кафедрой строительных материалов, конструкций и сооружений в Украинском государственном университете железнодорожного транспорта профессором А. А. Плугиным,

заведуючим кафедрой физико-химической механики и технологии строительных материалов Харьковского национального университета строительства и архитектуры профессором В. П. Соповым.

В науке имя Отара Петровича Мchedлова-Петросяна сохранится надолго, а в моём сердце — навсегда. Он открыл мне дорогу к изучению силикатных материалов, к организации конгрессов, а также к сотрудничеству с университетами, где он вел свою научную деятельность.

*Ученый секретарь Международных конгрессов по строительным материалам в Веймаре «Ibausil», Почётный профессор Украинского государственного университета железнодорожного транспорта и Харьковского национального университета строительства и архитектуры, доктор-инженер Ханс-Берtram Фишер*

Отар Петрович и «Ibausil»: фотореминисценции



Отар Петрович делает пленарный доклад





Встреча с ученым секретарём «Ibausil» 1970-х годов Dr. Werner Riedel



Работа на секции



Встреча на «Ibausi» в 1990-е годы. Справа – налево: Х.-Б. Фишер, Отар Петрович, его ученик профессор М. Г. Дюженко



«Заботы» во время вечерних заседаний конгресса

УДК 691.335:699.8

**ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ КОМПЛЕКСНОЇ ХІМІЧНОЇ ДОБАВКИ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЄ ПРОНИКНУ ДІЮ, НА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РЕМОНТНОЇ КОМПОЗИЦІЇ НА ОСНОВІ ШЛАКОЛУЖНОГО В'ЯЖУЧОГО**

Д-р техн. наук А. А. Плугін, канд. техн. наук В. А. Лютий,  
асп. Ю. Ю. Савчук

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КОМПЛЕКСНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ДОБАВКИ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ ПРОНИКАЮЩЕЕ ДЕЙСТВИЕ, НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РЕМОНТНОЙ КОМПОЗИЦИИ НА ОСНОВЕ ШЛАКОЩЕЛОЧНОГО ВЯЖУЩЕГО**

Д-р техн. наук А. А. Плугин, канд. техн. наук В. А. Лютий,  
асп. Ю. Ю. Савчук

**STUDY OF COMPREHENSIVE CHEMICAL ADDITIVES, PROVIDING A PERMEABLE ACTION ON PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES REPAIR COMPOSITION BASED BINDER SHLAKOLUZHNOHO**

**DSc A. A. Plugin, PhD V. A. Lyuty, graduate Yu. Yu. Savchuk**

*Стаття присвячена обґрунтуванню складу безцементної композиції проникної дії на основі доменного гранульованого шлаку і силікату натрію. Наведено результати дослідження впливу вмісту гідроксиду натрію і комплексної хімічної добавки, що забезпечує проникну дію, на фізико-механічні властивості композиції. Проведено електронно-мікроскопічні дослідження. Встановлено, що залежність міцності композиції від вмісту гідроксиду натрію має екстремальний характер з максимумом, що відповідає його вмісту близько 5 %. Кореляції між міцністю композиції на стиск та вмістом комплексної хімічної добавки в межах 1–3 % не виявлено. Встановлено, що продукти гідратації композиції переважно гелеподібні, кристалічні продукти гідратації представлені в меншій кількості призматичними та голкоподібними кристалами алюмінатних фаз. Розмір пор в структурі композиції переважно не перебільшує 2 мкм.*

**Ключові слова:** композиція проникної дії, шлаколужні в'язучі, кореляція, комплексна хімічна добавка.

*Статья посвящена обоснованию состава бесцементной композиции проникающего действия на основе доменного гранулированного шлака и силиката натрия. Приведены результаты исследования влияния содержания гидроксида натрия и комплексной химической добавки, обеспечивающей проникающее действие, на физико-механические свойства композиции. Проведены электронно-микроскопические исследования. Установлено, что зависимость прочности композиции от содержания гидроксида натрия имеет экстремальный характер с максимумом, что соответствует его содержанию около 5 %. Корреляция между прочностью композиции на сжатие и содержанием комплексной химической добавки в пределах 1-3 % не выявлена. Установлено, что продукты гидратации композиции преимущественно гелеобразные, кристаллические продукты гидратации представлены в меньшем количестве призматическими и игольчатыми кристаллами алюминатных фаз. Размер пор в структуре композиции преимущественно не превышает 2 мкм.*

**Ключевые слова:** композиция проникающего действия, шлакощелочные вяжущие, корреляция, комплексная химическая добавка.

*The article is devoted to the substantiation of the non-cement composition of penetrating action on the basis of blast furnace granulated slag and sodium silicate. The results of the investigation of the influence of the content of sodium hydroxide and the complex chemical additive that provides penetrating action on the physical and mechanical properties of the composition are given. Electronic-microscopic research was carried out. It was established that the dependence of the composition strength of the sodium hydroxide content has an extreme nature with a maximum corresponding to its content of about 5 %. Correlation between the strength of the composition for compression and the content of a complex chemical additive within 1-3 % was not revealed.. It has been found that the hydration products of the composition are preferably gel-like, crystalline hydration products presented in a smaller number of prismatic and needle-like crystals of aluminate phases. The pore size in the composition of the composition preferably does not exceed 2  $\mu\text{m}$ .*

**Key words:** composition of penetrating action, silicone binders, correlation, complex chemical additive.

**Вступ.** Залізобетонні конструкції інженерних споруд в процесі тривалої експлуатації зазнають пошкоджень не тільки від механічних навантажень, а й температурно-вологісних впливів і деформацій, впливу агресивних середовищ, інших зовнішніх і внутрішніх відносно конструкції факторів [1-3]. В сучасних умовах зростання обсягів промислового виробництва, у т.ч. теплоенергетики, металургії, транспортних перевезень тощо, збільшуються обсяги викидів саме агресивних газоподібних, рідких і твердих речовин, витоків електричних струмів і відповідних потенціалів, які впливають на будівельні конструкції та споруди. Це вимагає підвищувати вимоги до захисту будівельних конструкцій та споруд від агресивних впливів хімічно та біологічно активних середовищ, електричних струмів і потенціалів. Особливо інтенсивно пошкодження утворюються і розвиваються в конструкціях інженерних споруд металургійних підприємств (рис. 1) [4].

Захист конструкції від агресивних впливів передбачає виготовлення конструкцій та зведення споруд із матеріалів, стійких до цих впливів (первинний захист), виконання захисних покриттів із антикорозійних матеріалів (вторинний захист) тощо

[5]. Переважна кількість сучасних будівельних матеріалів виготовляється на основі портландцементу та його різновидів, для захисту конструкцій застосовуються будівельні розчини, сухі суміші, штукатурки з них тощо. Одним із популярних і ефективних сучасних способів захисту і ремонту залізобетонних конструкцій є застосування композицій проникної дії на основі портландцементу [6, 7].

Проте матеріали на основі портландцементу часто є недостатньо стійкими в багатьох умовах експлуатації. В першу чергу це стосується конструкцій інженерних споруд металургійних підприємств (рис. 1) [4]. У зв'язку з цим звертають на себе увагу шлаколужні в'язучі, що виготовляються із доменних гранульованих шлаків і мають досить високу корозійну стійкість в багатьох середовищах [8, 9]. Тому розробка композицій проникної дії на основі шлаколужних в'язучих, які були б стійкими в умовах експлуатації металургійних підприємств і могли б виготовлятися із наявної на них сировини, є актуальним завданням. Створення таких композицій одночасно сприятиме розв'язанню екологічних та економічних проблем (використання відходів промисловості).



Рис. 1. Пошкодження залізобетонної прогонової споруди шляхопроводу № 11а ПАТ «ММК «Азовсталь» (м. Маріуполь)

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Композиції проникної дії для ремонту і захисту конструкцій інженерних споруд металургійних підприємств мають бути стійкими в умовах їх експлуатації. На ці конструкції впливає специфічна атмосфера, що містить гази, рідкі й тверді аерозолі [4]. З них агресивними до конструкцій є гази та аерозолі, які екологи звичайно розглядають як атмосферні забруднювачі – первинні або вторинні [10]. Встановлено [4], що до таких пошкоджень залізобетонних конструкцій шляхопроводів призводять руйнівні впливи, характерні для металургійних підприємств:

- підвищений вміст кислих газів, які спричиняють нейтралізацію захисного шару бетону і корозію арматури: вуглекислого газу  $CO_2$ , що утворюється в результаті повного згоряння вуглецевих речовин; сірчаного ангідриду  $SO_2$ , що утворюється під час спалювання сірковмісного палива, переробки сірчистих руд, згоряння органічних залишків у гірничорудних відвалах;

- сполуки фтору – фтороводень  $HF$ , пил (аерозоль) фториду натрію  $NaF$  і кальцію  $CaF_2$ ;

- підвищена температура, що інтенсифікує нейтралізацію захисного шару бетону і корозію арматури кислими газами;
- струми витоку та блукаючі струми з електрифікованих постійним струмом залізничних колій і технологічного обладнання (електропечей тощо);

- наявність у повітрі хлорид-іонів  $Cl^{2-}$ , сульфат-іонів  $SO_4^{2-}$  від близькості моря (для металургійних комбінатів Маріуполя).

Проникна дія, зчеплення з ремонтваною поверхнею і водонепроникність композицій проникної дії залежать від їх структури [11, 12] і досягаються за рахунок уведення хімічних [13-15] та мінеральних добавок [16-18], дисперсного армування [19-24]. Комплекс таких добавок, серед яких нітрати, карбонати, сульфати, хлориди натрію і кальцію, запропоновано у [14, 15, 18, 22-24], проте дія цієї комплексної добавки перевірена лише для портландцементу та його різновидів.

Мінеральні добавки і дисперсне армування обумовлюють утворення щільної водонепроникної структури покриття, знижують усадкові явища. Хімічні добавки обумовлюють утворення комплексних солей – гідронітро-,

гідрокарбо-, гідросульфо-, гідрохлоралюмінатів кальцію, що кольматують поровий простір як покриття, так і поверхневого шару бетону ремонтваної конструкції (за рахунок дифузійного проникнення іонів) і забезпечують їм повну водонепроникність. Умови утворення, морфологічні особливості, характер розташування у структурі цементного цих комплексних солей досліджені у роботах [12, 25-28]. Вплив шлаку на властивості композицій проникної дії досліджувався і враховувався у [29, 24], проте не для безцементних в'язучих.

#### **Визначення завдань досліджень.**

Вищевикладене обумовило на цьому етапі дослідження спільного впливу лужного компоненту шлаколужного в'язучого і комплексу хімічних добавок, що забезпечують проникну дію і водонепроникність композиції, на її фізико-механічні властивості, а також виконання електронно-мікроскопічних досліджень особливостей морфології і розподілу у шлаколужному камені гідронітро-, гідрокарбо-, гідросульфо-, гідрохлоралюмінатів кальцію.

#### **Матеріали і методи дослідження.**

Досліджували композицію із піску кварцового з модулем крупності 1,1, доменного гранульованого шлаку ПАТ «ММК «Азовсталь» (маріупольського), меленого до проходження крізь сито 008 не менше 85 %, гідроксиду натрію NaOH. У складі комплексної хімічної добавки, що забезпечує проникну дію і водонепроникність композиції, застосовували нітрати, карбонати, сульфати, хлориди натрію і кальцію у співвідношенні, встановленому у [14, 15, 18, 22-24]. Із всіх компонентів готували суху суміш, яку безпосередньо перед застосуванням замішували водою. Досліджували залежність середньої густини, вологопоглинання, міцності на згин і стиск, водостійкості (коефіцієнта розм'якшення) композиції від вмісту гідроксиду натрію і комплексної хімічної

добавки. Зв'язок між ними оцінювали коефіцієнтом кореляції за шкалою Чеддока.

Для дослідження готували суміші з різними співвідношеннями компонентів. Співвідношення у базовому складі: піску – 60 %, шлаку – 35 %, гідроксиду натрію – 5 % за масою. Кількість гідроксиду натрію варіювали від 2 до 20 %, комплексної хімічної добавки – до 3 %. Під час збільшення кількості гідроксиду натрію і комплексної хімічної добавки співвідношення піску і шлаку 60:35 зберігали. Для визначення міцності на згин і стиск і середньої густини, водопоглинання, водостійкості (коефіцієнта розм'якшення) із суміші виготовляли зразки-балочки розміром 40×10×10 мм, які випробували після встановленого терміну природного твердіння стандартними (традиційними) методами. Коефіцієнт розм'якшення визначали як відношення міцності зразка на стиск у водонасиченому до постійної маси стані до міцності на стиск у повітряно-сухому стані.

Електронно-мікроскопічні дослідження структури шлаколужного каменю здійснювали на його відколах за допомогою скануючого електронного мікроскопа Philips XL 30 ESEM-FEG в інституті будівельних матеріалів ім. Ф. А. Фінгера Веймарського архітектурно-будівельного університету. Зйомку проводили під напругою 15 кВ.

#### **Результати досліджень та їх аналіз.**

Залежності міцності на стиск і середньої густини композиції від вмісту гідроксиду натрію і комплексної хімічної добавки наведені на рис. 2-4.

Електронно-мікроскопічні знімки шлаколужного каменю з вмістом гідроксиду натрію 5 % і комплексної хімічної добавки 1,5 % від маси шлаку наведені на рис. 5.

В результаті аналізу експериментальних залежностей міцності на стиск і середньої густини композиції від вмісту гідроксиду натрію і комплексної хімічної добавки встановлено:

- між міцністю на стиск композиції та вмістом гідроксиду натрію існує висока і дуже висока кореляція (квадрат коефіцієнта кореляції  $R^2$  складає 0,8 та більше, коефіцієнт кореляції  $R$  понад 0,9);

- між міцністю на стиск композиції та вмістом комплексної хімічної добавки в межах 1–3 % кореляції не виявлено;

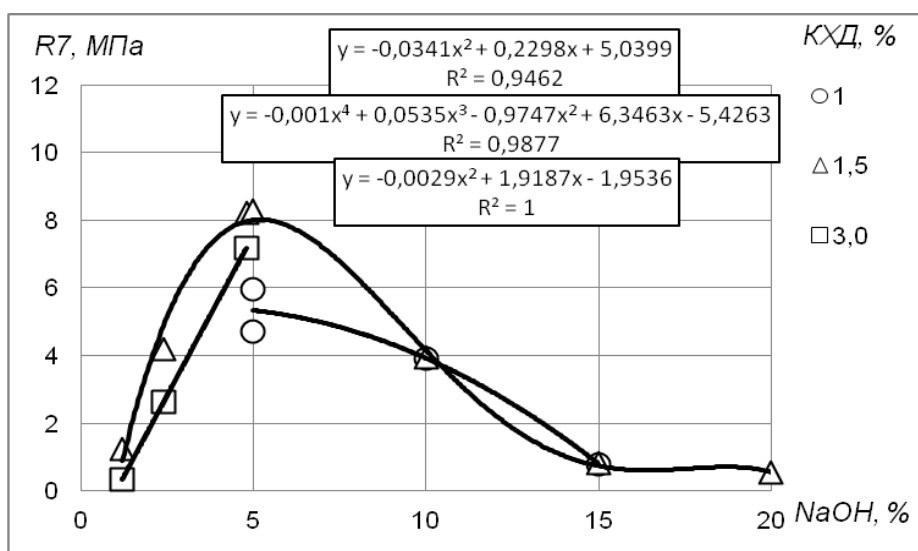
- між середньою густиною композиції та вмістом гідроксиду натрію існує помірна кореляція (квадрат коефіцієнта кореляції  $R^2 = 0,3$ , коефіцієнт кореляції  $R = 0,55$ );

- між середньою густиною композиції та вмістом комплексної хімічної добавки кореляція відсутня (квадрат коефіцієнта кореляції  $R^2 = 0,03$ , коефіцієнт кореляції  $R = 0,16$ );

- залежність міцності композиції від вмісту гідроксиду натрію має екстремальний характер з максимумом, що відповідає вмісту гідроксиду натрію близько 5 %;

- отримані показники міцності є невисокими – до 12 МПа, що може бути пояснено особливостями методики їх визначення.

а



б

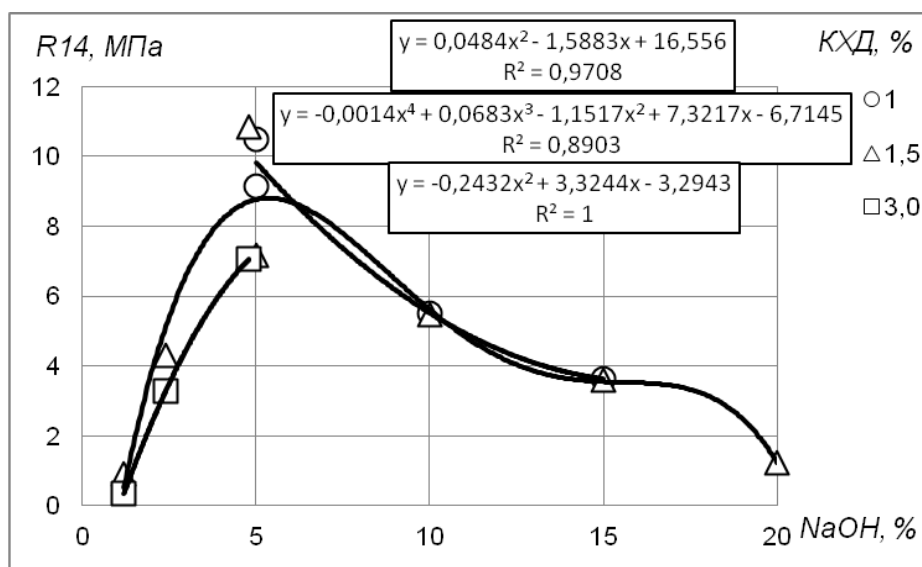
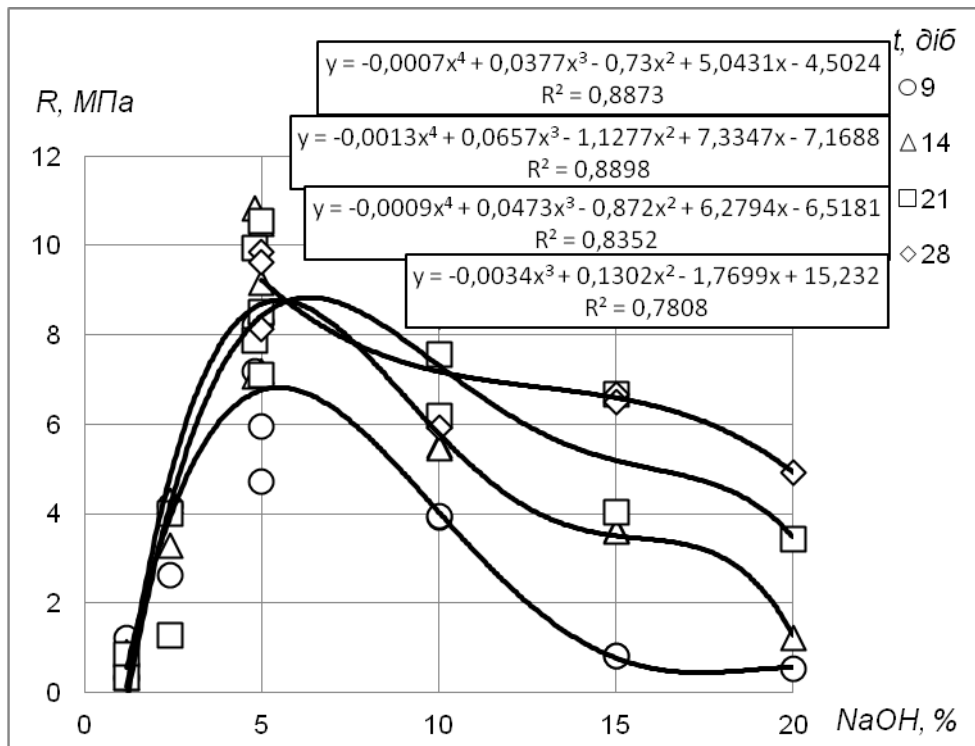


Рис. 2. Залежність міцності на стиск композиції від вмісту гідроксиду натрію через 7 (а) та 14 (б) діб

а



б

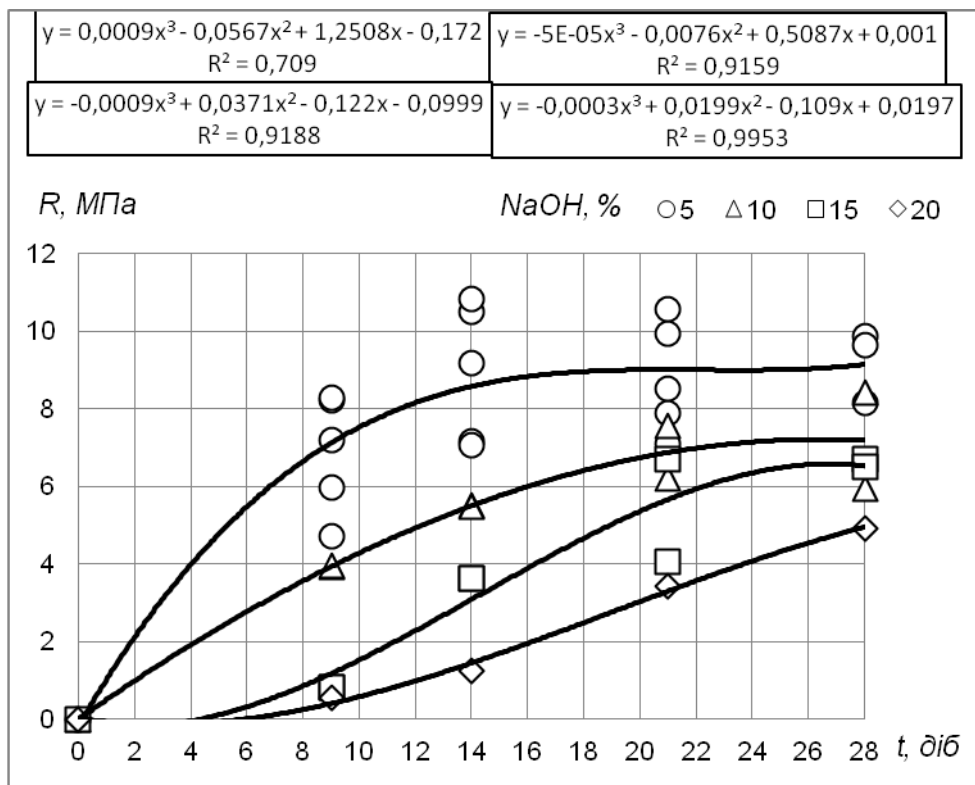
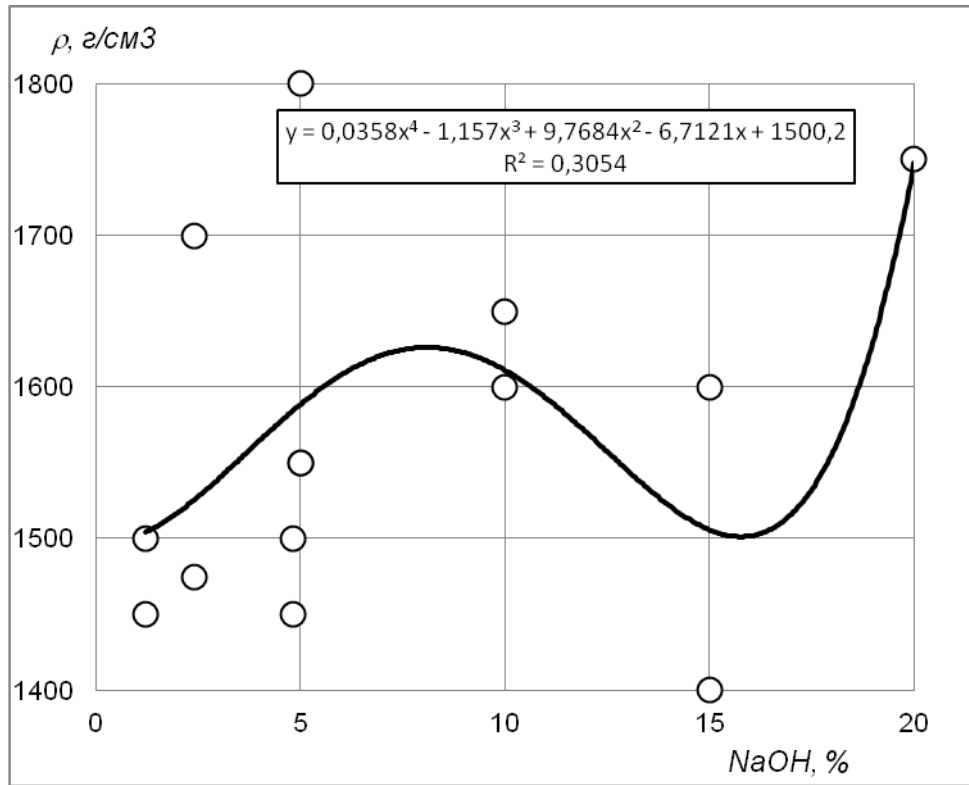


Рис. 3. Залежність міцності на стиск композиції (вміст КХД узагальнено) від вмісту гідроксиду натрію  $NaOH$  у різні терміни твердіння  $t$  (а) та від часу твердіння (кінетичні залежності) з різним вмістом  $NaOH$  (б)



а



б

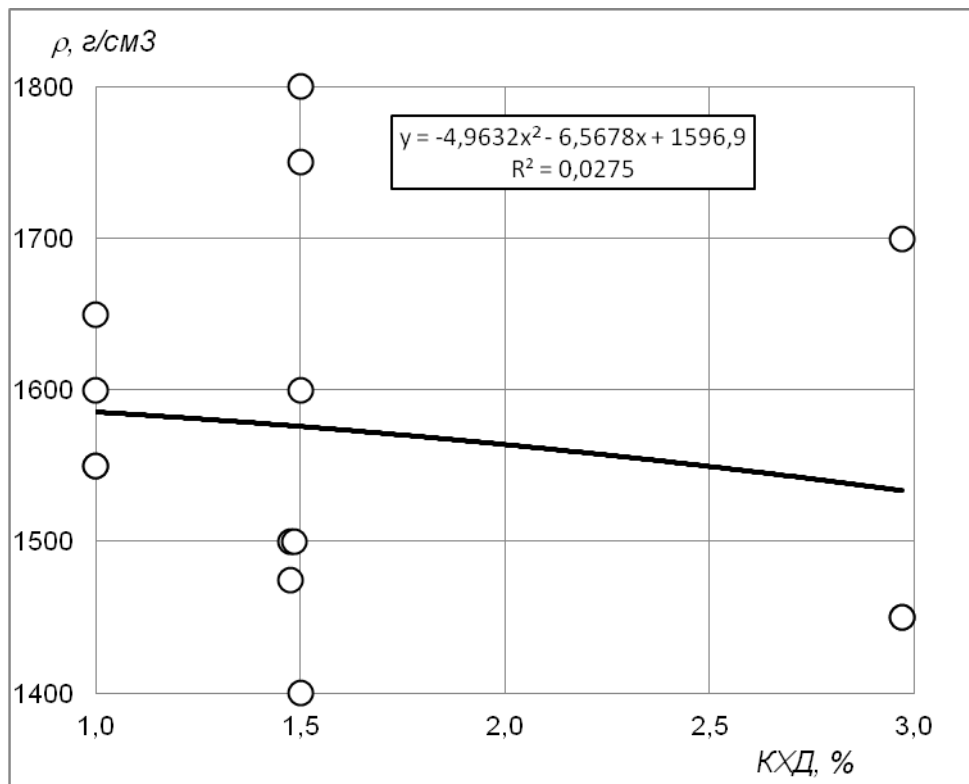
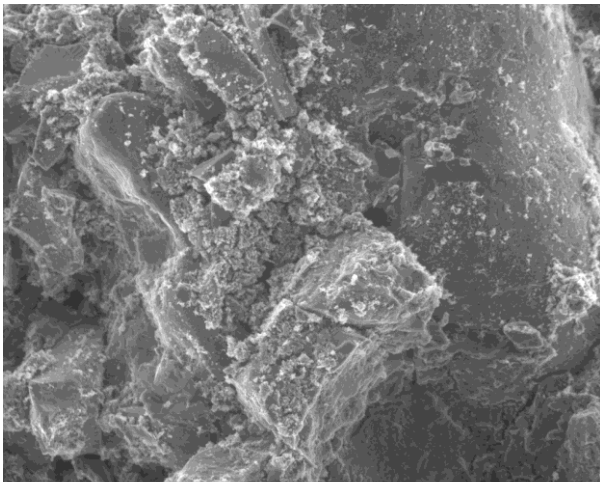


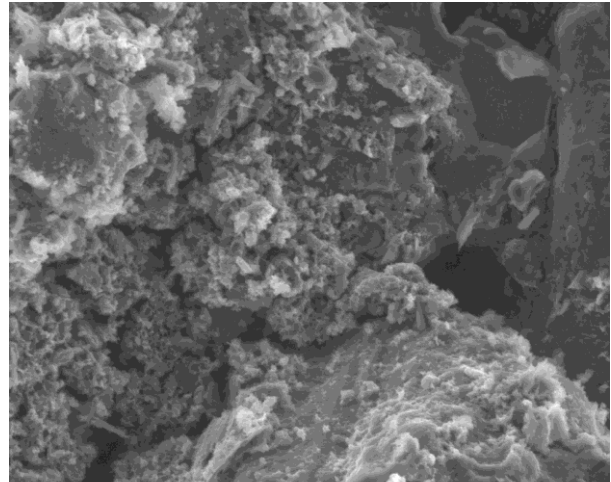
Рис. 4. Залежність середньої густини  $\rho$  композиції від вмісту гідроксиду натрію  $NaOH$  (а) і комплексної хімічної добавки КХД (б)

*a*



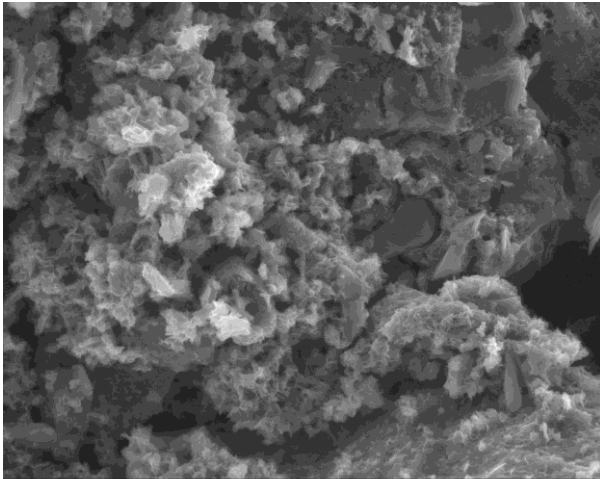
Mic	HV	WD	Mag	Det	W7
XL	15 kV	10,3 mm	300 x	GSE	—50 μm—

*б*



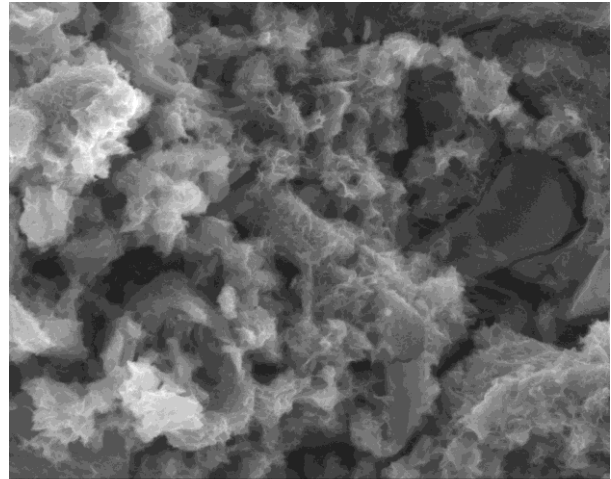
Mic	HV	WD	Mag	Det	W7
XL	15 kV	10,4 mm	1000 x	GSE	—20 μm—

*в*



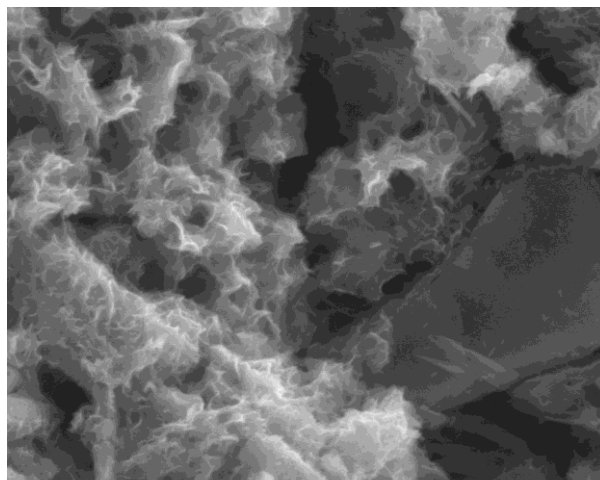
Mic	HV	WD	Mag	Det	W7
XL	15 kV	10,4 mm	2000 x	GSE	—10 μm—

*г*



Mic	HV	WD	Mag	Det	W7
XL	15 kV	10,4 mm	4000 x	GSE	—5 μm—

*д*



Mic	HV	WD	Mag	Det	W7
XL	15 kV	10,4 mm	8000 x	GSE	—2 μm—

Рис. 5. Електронно-мікроскопічні знімки композиції зі збільшенням:  
*a* – ×300; *б* – ×1000; *в* – ×2000;  
*г* – ×4000; *д* – ×8000. Кожен наступний знімок є збільшеним фрагментом попереднього

В результаті аналізу електронно-мікроскопічних знімків, найбільш характерні з яких наведені на рис. 5, встановлено таке. На рис. 5, а видно частку піску (праворуч) і частки шлаку (ліворуч), вкриті продуктами гідратації. Продукти гідратації переважно гелеподібні (рис. 5, в-д), очевидно – гідросилікатний гель і цеолітоподібні натрієво-кальцієві гідроалюмосилікати. В меншій кількості спостерігаються кристалічні продукти гідратації – призматичні та голкоподібні кристали довжиною до 2 мкм (рис. 5, б, г, д), очевидно – комплексні солі алюмінатних AFm and AFt фаз [26-28]. Не спостерігаються гексагональні пластини портландиту, що може свідчити про загальний дефіцит кристалічних продуктів гідратації та електрогетерогенних контактів і, як наслідок, невисокі показники міцності. Більшість пор – розміром до 2 мкм між продуктами гідратації (рис. 5, г, д), найбільший розмір пор – до 10 мкм (поодинокі пори в контактній зоні зерна піску, рис. 5, б).

**Висновки і рекомендації.** В результаті проведених досліджень встановлено:

- залежність міцності композиції від вмісту гідроксиду натрію має екстремальний характер з максимумом, що відповідає його вмісту близько 5 %;

- між міцністю на стиск композиції та вмістом комплексної хімічної добавки в межах 1–3 % кореляції не виявлено;

- продукти гідратації композиції переважно гелеподібні, очевидно – гідросилікатний гель і цеолітоподібні натрієво-кальцієві гідроалюмосилікати, кристалічні продукти гідратації представлені в меншій кількості призматичними та голкоподібними кристалами, очевидно, комплексних солей алюмінатних фаз;

- розмір пор в структурі композиції переважно не перебільшує 2 мкм, хоча зустрічаються окремі пори розміром до 10 мкм.

Рекомендується виконати фізико-хімічні дослідження складу продуктів гідратації композиції і дослідити процес проникнення і кольтатації продуктами гідратації композиції поверхневого шару бетону та їх вплив на водонепроникність.

### Список використаних джерел

1. Пухонто, Л. М. Довговічність залізобетонних конструкцій інженерних споруд [Текст] / Л. М. Пухонто. – М., 2004. – С. 6-13.
2. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: Промислові та цивільні будівлі та споруди [Текст] / А. А. Пługін, В. І. Наконечний, Є. Г. Щур [та ін.] // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 87. – С. 68-79.
3. Аналіз впливу агресивних дій на конструкції та споруди залізниць: Огляд характерних пошкоджень залізобетонних, бетонних і кам'яних конструкцій штучних споруд [Текст] / А. А. Пługін, В. О. Систренський, О. О. Скорик [та ін.] // Проблеми надійності та довговічності інженерних споруд та будівель на залізничному транспорті: зб. наук. праць. – Харків: УкрДАЗТ, 2007. – Вип. 87. – С. 79-88.
4. Савчук, Ю. Ю. Агресивні впливи на залізобетонні конструкції залізничних мостів на металургійних підприємствах [Текст] / Ю. Ю. Савчук, В. А. Лютий, А. А. Пługін // Композиційні будівельні матеріали і виробы – шляхи підвищення надійності, довговічності, корозієстійкості: зб. мат. Всеукр. інтер. конф. молодих учених і студентів. – Полтава, 2015. – С. 27-29.
5. Захист будівельних конструкцій і споруд від агресивних дій з рішенням практичних задач [Текст] / В. І. Бабушкін, А. А. Пługін, І. Е. Казімагомедов [та ін.]. – Харків: УкрДАЗТ, 2006. – 214 с.

6. Безусадочные сухие строительные смеси широкого спектра действия [Текст] / В. И. Бабушкин, Т. А. Костюк, Е. В. Кондращенко [и др.] // Всерос. науч.-практ. конф. «Строительное материаловедение – теория и практика». – Москва: СИП РИА, 2006. – С. 106–108.
7. Bondarenko D.O., Yakovleva R.A., Kostiuk T.O., Proshin O.Yu. Multifunctional composites «Viatron» in construction // 30<sup>th</sup> SAMPE Europe International Jubilee Conference, Paris, 2009. – P. 563–569.
8. Кривенко, П. В. Долговечность шлакощелочного бетона [Текст] / П. В. Кривенко, Е. К. Пушкарева. – К.: Будівельник, 1993. – 224 с.
9. Бродко, О. А. Шлакощелочные вяжущие и бетоны повышенной кислотостойкости [Текст]: дисс... канд. техн. наук: 05.23.05 / О. А. Бродко. – К.: КИСИ, 1991. – 227 с.
10. Загрязнение воздуха [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.burenina.narod.ru/6-3.htm>.
11. Костюк, Т. А. О формировании структуры проникающей гидроизоляции [Текст] / Т. А. Костюк, Е. В. Кондращенко // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2007. – Вип. 43. – С. 138-141.
12. Физико-химические исследования цементного камня с химическими и минеральными добавками, повышающими трещиностойкость и водонепроницаемость [Текст] / М. Г. Салия, Т. А. Костюк, Ю. А. Спирич [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2012. – Вип. 130. – С.49-56.
13. Обоснование выбора солей-электролитов для содержащих кальцит и стекловолоконно комплексных добавок в гидроизоляционные смеси [Текст] / Т. А. Костюк, А. А. Плугин, Н. Н. Партала [и др.] // Будівельні матеріали, вироби та санітарна техніка. – 2012. – №44. – С. 105–108.
14. Композиційний матеріал для ремонтних та інших будівельних робіт [Текст] : Пат. 103280 UA / Т.А. Костюк, В.Н. Арутюнов, А.А. Плугін, О.В. Старкова, Д.О.Бондаренко; заявитель и патентообладатель ХНУБА. – № а 2012 11582 UA; заявл. 08.10.2012; опубл. 25.09.2013. – Бюл. № 18. – 4 с.
15. Композиційний матеріал для екстреного ремонту та відновлення бетонних та кам'яних споруд [Текст]: пат.103852 UA / Т.А. Костюк, В.Н. Арутюнов, А.А. Плугін, О.В. Старкова, Д.О. Бондаренко, заявитель и патентообладатель ХНУБА. – № а 2012 12669; заявл. 06.11.2012; опубл. 25.11.2013. – Бюл. № 22. – 4 с.
16. Обоснование выбора наполнителей для гидроизоляционных сухих смесей на основе портландцемента [Текст] / А. А. Плугин, Т. А. Костюк, М. Г. Салия [и др.] // VIII Междунар. науч.-практ. конф. «Ключевые вопросы в современной науке – 2012». – София: БялГрад-БГ, 2012. – Т. 29. – С. 62–67.
17. Применение карбонатных минеральных добавок для снижения усадки цементных растворов [Текст] / А. А. Плугин, Т. А. Костюк, Д. А. Бондаренко [и др.] // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХДТУБА, 2010. – Вип. 59. – С. 157–162.
18. Композиційний матеріал для фарбування з гідроізоляційними властивостями [Текст]: пат.107431 UA / А.А. Плугін, Т.О. Костюк, Д.О. Бондаренко, О.А. Плугін, Н.М. Партала, С.Г. Нестеренко; заявитель и патентообладатель УкрДАЗТ. – № а 2013 14204; заявл. 05.12.2013; опубл. 25.12.2014. – Бюл. № 24. – 6 с.
19. Кондращенко, Е. В. Влияние фиброармирования на свойства смесей проникающего действия [Текст] / Е. В. Кондращенко, Т. А. Костюк // Коммунальное хозяйство городов. – 2007. – Вып.76. – С. 59–63.
20. Плугин, А. А. Изотропное микроармирование цементного камня продуктами гидратации для повышения физико-механических характеристик гидроизоляционных

покрытий [Текст] / А. А. Плугин, М. Г. Салия, Т. А. Костюк // Вісник НТУ «ХПИ». – Харків, 2011. – Вип. 50. – С. 97–103.

21. Плугин, А. А. Гидроизоляционные составы на основе портландцемента, армированные полимерными волокнами: оценка возможности применения полиэфирной микрофибры [Текст] / А. А. Плугин, В. А. Арутюнов, Т. А. Костюк // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – Вип. 138. – С. 70–77.

22. Влияние волокнистых наполнителей на физико-механические свойства цементных композитов [Текст] / Т. А. Костюк, А. А. Плугин, Ал. А. Плугин [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 148. – Ч.2. – С. 32–38. URL: <http://csw.kart.edu.ua/article/view/70890>.

23. Plugin, A.A. 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, V.31, P.59-68, 2017. - doi:10.4028/www.scientific.net/JERA.31.59.

24. Композиція для виготовлення рулонного матеріалу для гідроізоляції та ремонту [Текст]: пат. 111024 UA / А.А. Плуґін, Т.О. Костюк, О.А. Плуґін, Д.О. Бондаренко, Н.М. Партала, Ю.А. Суханова, заявитель и патентообладатель УкрДУЗТ; № 2014 12308; заявл. 17.11.2014; опубл. 10.03.2016. – Бюл. № 5. – 5 с.

25. Взаимодействие продуктов гидратации портландцемента с комплексными химическими добавками со стекловолокном в гидроизоляционных цементных композициях [Текст] / О. И. Демина, А. А. Плугин, Е. Б. Деденева [и др.] // Functional Materials. 2017; 24(3).

26. T. Matschei, B. Lothenbach, F.P. Glasser, The AFm phase in Portland cement, Cem.Concr.Res. 37(2) (2007) 118-130.

27. M. Balonis, B. Lothenbach, G. Le Saout, F.P. Glasser, Impact of chloride on the mineralogy of hydrated Portland cement systems, Cem. Concr. Res. 40(7) (2010) 1009-1022.

28. M. Balonis, M. Medala, F.P. Glasser, Influence of calcium nitrate and nitrite on the constitution of the AFm and AFt cement hydrates - experiments and thermodynamic modelling, Adv. Cem. Res. 23(3) (2011).

29. Бабушкин, В. И. Анализ свойств гидроизоляции проникающего действия с использованием портландцемента с добавками шлака [Текст] / В. И. Бабушкин, Е. В. Кондращенко, Т. А. Костюк // Вестник НТУ «ХПИ». – Харьков, 2007. – Вып. 9. – С. 3-7.

---

Плуґін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63. E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Лютій Віталій Анатолійович, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-64. E-mail: [lytij\\_va@kart.edu.ua](mailto:lytij_va@kart.edu.ua).

Савчук Юлія Юріївна, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-64. E-mail: [uliasavhyk83@gmail.com](mailto:uliasavhyk83@gmail.com).

Plugin Andrii A., DSc, Professor, Head of Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 057 730-10-63. E-mail: [plugin\\_aa@kart.edu.ua](mailto:plugin_aa@kart.edu.ua).

Lyuty Vitalii A., PhD, Associate Professor of Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057) 730-10-64. E-mail: [lytij\\_va@kart.edu.ua](mailto:lytij_va@kart.edu.ua).

Savchuk Ulia, graduate of Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel: (057) 730-10-64. E-mail [uliasavhyk83@gmail.com](mailto:uliasavhyk83@gmail.com).

Стаття прийнята 12.08.2017 р.

УДК 691.5

## ВПЛИВ ФОСФОГІПСУ НА АКТИВНІСТЬ ШЛАКОВОГО В'ЯЖУЧОГО

Д-р техн. наук В. І. Вінниченко, канд. техн. наук В. О. Буцький,  
д-р техн. наук Т. О. Костюк (ХНУБА), д-р техн. наук А. А. Плугін (УкрДУЗТ),  
інж. Д. Браїцев («AUMUND Fördertechnik GmbH», Німеччина)

## ВЛИЯНИЕ ФОСФОГИПСА НА АКТИВНОСТЬ ШЛАКОВОГО ВЯЖУЩЕГО

Д-р техн. наук В. И. Винниченко, канд. техн. наук В. А. Буцкий,  
д-р техн. наук Т. А. Костюк (ХНУСА), д-р техн. наук А. А. Плагин (УкрГУЖТ),  
инж. Д. Брайтцев («AUMUND Fördertechnik GmbH», Германия)

## EFFECT OF PHOSPHOGYPSUS TO THE SLAG BINDER ACTIVITY

DSc V. I. Vinnichenko, PhD V. O. Butskii, DSc T. O. Kostiuk,  
DSc A. A. Plugin, D. Braitsev

*Показано екологічну проблему утилізації металургійних шлаків. У результаті аналітичного огляду літературних джерел встановлено різновиди й тоннаж наявних в Україні шлаків, їх хімічний склад, дані про гідравлічну активність шлаків різного виду. Визначено, що навіть найбільш активні шлаки самостійно не твердіють і потребують активації. Запропоновано утилізувати шлаки шляхом виробництва стінових штучних виробів, активацію здійснювати сполученням механічної активації пресуванням і хімічної – добавкою фосфогіпсу. Встановлено залежності фізико-механічних властивостей пресованого каменю від виду шлаку і кількості добавки фосфогіпсу.*

**Ключові слова:** шлак, фосфогіпс, міцність на стиск, пресування.

*Показана экологическая проблема утилизации металлургических шлаков. В результате аналитического обзора литературных источников установлены разновидности и тоннаж имеющихся в Украине шлаков, их химический состав, данные о гидравлической активности шлаков разного вида. Установлено, что даже наиболее активные шлаки самостоятельно не твердеют и требуют активации. Предложено утилизировать шлаки путем производства стеновых штучных изделий, активацию осуществляют сочетанием механической активации прессованием и химической – добавкой фосфогипса. Установлены зависимости физико-механических свойств прессованного камня от вида шлака и количества добавки фосфогипса.*

**Ключевые слова:** шлак, фосфогипс, прочность на сжатие, прессование.

*The ecological problem of utilization of metallurgical slags is shown. As a result of the analytical review of literature sources, there are varieties and tonnage of slags in Ukraine, their chemical composition, data on the hydraulic activity of slags of various types. The most active are granulated slags, which contain the largest amount of glass phase. The waste crystallized slags are the least active. It has been established that even the most active slag does not harden independently and requires activation. It is proposed to utilize slags by producing walled piece products, activation is carried out by a combination of mechanical activation by pressing and chemical additive of phosphogypsum. Experimental studies were carried out for the slags of the Dnieper Metallurgical Combine and phosphogypsum from the dumps in Kamensk. As a result of electron microscopic studies, it is established that the slag dross is partially hydrated, which further*

*reduces their activity. Dependences of the physical-mechanical properties of the pressed stone on the type of slag and the amount of the phosphogypsum additive are established. The addition of 2.5 % phosphogypsum ensured a compression strength of 20 MPa sufficient for walled piece products.*

**Keywords:** Slag, phosphogypsum, compressive strength, compression.

**Вступ.** За запасами основних видів корисних копалин на душу населення Україна посідає одне з перших місць у Європі [1]. Негативні наслідки їх переробки — забруднення земель, повітря й води, складування відходів на значних площах. Земна кора на 86,5 % складається із силікатів [2], тому значну частину мінеральних відходів і побічних продуктів становлять переважно кремнезем, силікати й алюмосилікати кальцію та магнію. За масштабами негативного впливу на навколишнє середовище чорна металургія стоїть на четвертому місці серед галузей промисловості. У 2000 р. Європейською конференцією зі шлаків в Дюссельдорфі була заснована загальноєвропейська асоціація шлаків «Єврошлак», ядром якої став німецький дослідний інститут металургійних шлаків [3].

Ефективність діяльності цієї структури характеризується тим, що в країнах Євросоюзу утилізуються практично всі доменні шлаки і 75 % сталеплавильних. На жаль, в Україні проблеми утилізації шлаків, крім доменних гранульованих основних, практично не вирішуються — на початок 2004 року загальна кількість накопичених шлаків на металургійних підприємствах склала близько 190 млн т. Отже, утилізація шлаків в Україні залишається дуже актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У загальному балансі шлаків на першому місці за кількістю стоять доменні. Хімічний склад доменних шлаків подано в основному чотирма оксидами: CaO (29...30 %), MgO (0...18 %), Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5...23 %), SiO<sub>2</sub> (30...40 %). У невеликій кількості в них містяться оксиди заліза (0,2...0,6 %) і марганцю (0,3...1 %), сірка (0,5...3,1 %) [3, 4]. Ці оксиди утворюють до

сорока подвійних і потрійних сполук, основними з яких є силікати, алюмосилікати, алюмінати, алюмоферити.

Практично в усіх металургійних шлаках крім продуктів кристалізації в тій або іншій мірі міститься скляна фаза. У відвальних повільно охолоджених основних шлаках кількість скла незначна, а у гранульованих доменних — досягає 98 %. Скло є термодинамічно нестійкою фазою і значною мірою визначає хімічну активність шлаків. Шлакове скло взаємодіє з водою значно інтенсивніше, ніж кристали шлакових мінералів. Тому відвальні шлаки придатні переважно для відсіпання дорожніх та інших основ, як заповнювачі для цементних і асфальтових бетонів [5-7], хоча дослідження з їх застосування у складі в'язучих проводяться і цемента з такими шлаками патентуються [8].

У складі в'язучих речовин застосовують переважно доменні гранульовані шлаки, проте їх активності для самостійного твердіння у нормальних умовах не вистачає і вони потребують активації. Прикладом механічної активації є пресування виробів із напівсухих сумішей, проте тільки за рахунок пресування без добавок міцність, достатня для виготовлення штучних виробів, досягається за дуже високих економічно недоцільних значень тиску пресування [9]. Прикладом хімічної активації є шлакопортландцемент, який містить до 80 % шлаку, а 20 % клінкеру є активатором за рахунок виділення в результаті гідратації гідроксиду кальцію [10, 11]. Дуже ефективною є лужна активація шлаків, яка реалізується у шлаколужних в'язучих і бетонах [12-16]. Шлаколужні в'язучі і бетони характеризуються високими показниками міцності та стійкості в

багатьох умовах експлуатації [17, 18], проте застосовувані для них активатори – натрієве рідке скло, гідроксид натрію – є дорогими, що стримує їх застосування у рядових будівельних матеріалах. Ще у середині ХХ століття П. П. Будніков довів можливість застосування сульфату кальцію як активатора твердіння шлаків [19]. Вважаємо, що раціональне сполучення пресування з добавкою гіпсу, зокрема фосфогіпсу (також відходу), дасть змогу отримувати стінові штучні вироби.

Мета дослідження – визначення можливості отримання стінових штучних виробів шляхом пресування суміші доменного гранульованого шлаку й фосфогіпсу. Завдання дослідження: визначення залежностей фізико-механічних властивостей пресованого каменю від вмісту в суміші грану-

льованого та відвального меленого й немеленого доменного шлаку й фосфогіпсу.

**Основна частина дослідження.** У дослідженнях за сировину використовували такі матеріали: шлак доменний гранульований (ДГ), шлак доменний гранульований мелений (ДГм, (рис. 1)), шлак відвальний (В), шлак відвальний мелений (Вм, (рис. 2)), а також фосфогіпс з відвалів м. Кам'янськ.

Порівняльний аналіз знімків електронного мікроскопа шлаку гранульованого й відвального показав, що відвальний шлак є вже частково прогідратований. На рис. 2 на внутрішній поверхні пори (нижня частина рисунка) спостерігається вихід продуктів гідратного твердіння. Таким чином, як в'яжуче відвальний шлак буде найменш ефективним.

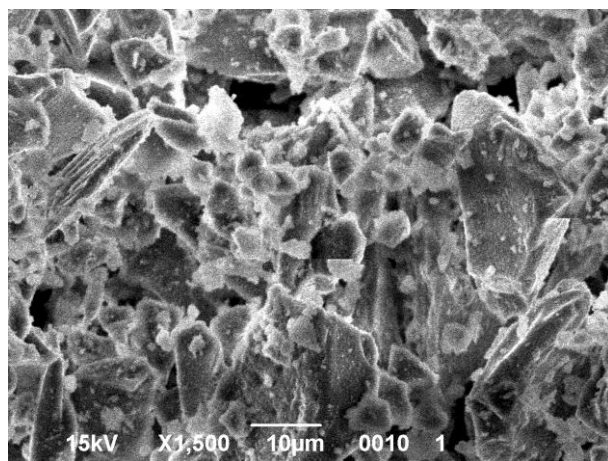
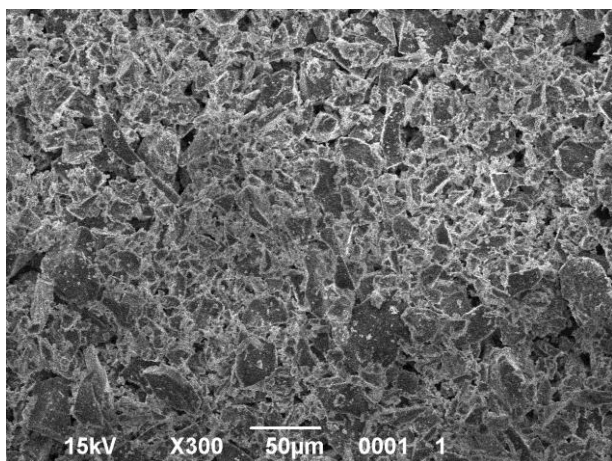


Рис. 1. Електронно-мікроскопічний знімок шлаку меленого доменного гранульованого

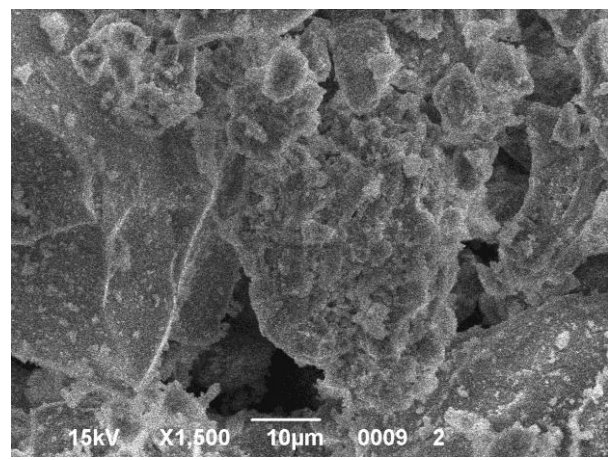
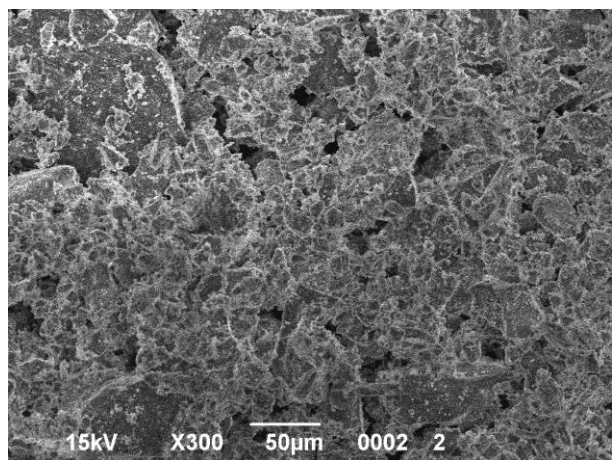


Рис. 2. Електронно-мікроскопічний знімок шлаку меленого відвального



Перший етап експериментальних досліджень було проведено із застосуванням шлаку доменного. Виходячи із власного досвіду, попередні експерименти були проведені із суміші 50/50 % ДГ/ДГМ з додаванням фосфогіпсу від 2,5 до 20 % і відповідного додавання води для нормального напівсухого формування на лабораторному гідравлічному пресі. Формування зразків проводили на лабораторному гідравлічному пресі (рис. 3, 4).

Зразки формували в прес-формі з внутрішніми розмірами 50×50 мм (рис. 5). Маса засипки сировинної суміші в прес-форму становила 135 г, тиск пресування – 25 МПа. З кожною величиною тиску пресування сформували по 5 зразків. Через наявність крупних частинок у немелених шлаках (ДГ, В), що входять до складу кожної із сумішей, ці шлаки були просіяні через сито № 5 (ГОСТ 8269.0). Склади сумішей наведені в табл. 1. Попередньо визначена вологість сировинних компонентів наведена у табл. 2.

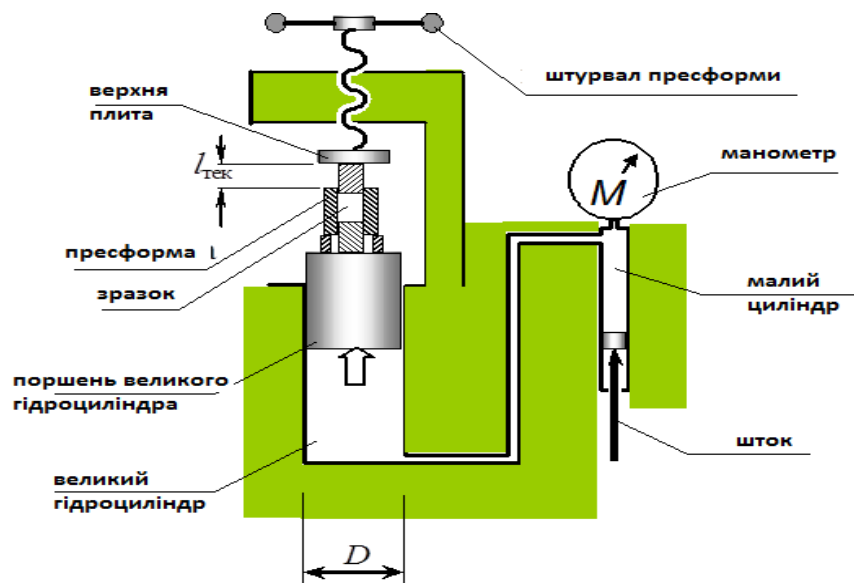


Рис. 3. Схема лабораторного гідравлічного преса



Рис. 4. Процес формування зразків



Рис. 5. Прес-форма для формування зразків

Таблиця 1

Склади сумішей для попередніх пошукових експериментів

Компоненти складу	Вміст компоненту									
	%	г	%	г	%	г	%	г	%	г
ФГ	2,4	25	4,7	50	9,5	100	14,2	150	19	200
Шлак ДГ (В)	46,4	487,5	45,2	475	42,9	450	40,5	425	38	400
Шлак ДГм (Вм)	46,4	487,5	45,2	475	42,9	450	40,5	425	38	400
Вода	4,7	50	4,7	50	4,7	50	4,7	50	4,7	50
Усього	100	1050	100	1050	100	1050	100	1050	100	1050

Таблиця 2

Результати вимірювання вологості сировинних компонентів

Компоненти	Маса після сушіння 1кг, г	Вологість, %
Шлак доменний гранульований (ДГ)	902	9,8
Шлак доменний гранульований мелений (ДГм)	974	2,6
Шлак відвальний молотий (Вм)	976	2,4
Фосфогіпс (ФГ)	878	12,2

**Результати дослідження.** У результаті пресування отримали щільні зразки з бічними поверхнями і гранями без дефектів (рис. 6), отже, обраного тиску пресування було достатньо для отримання якісного сирцю.

Міцність зразків на стиск визначали за допомогою того ж самого лабораторного

гідралічного преса. Міцність визначали після 14 і 28 діб нормального твердіння. Максимальна міцність зразків після 14 діб твердіння досягла 12 МПа, що орієнтовно забезпечує марку цегли 100. Результати визначення середньої щільності і міцності на стиск після 28 діб твердіння подано на рис. 7.



Рис. 6. Пресовані зразки

**Обговорення результатів.** Усі зразки, сформовані з відвального шлаку, навіть після 28 діб твердіння у нормальних умовах не набрали мінімальної для цегли міцності на стиск.

Міцність зразків, сформованих зі шлаку гранульованого з додаванням фос-

фогіпсу в кількості 2,5 % від маси суміші, після 28 діб досягла 20 МПа, що відповідає міцності рядової цегли. Уведення 10 % фосфогіпсу обумовило міцність, меншу на 10 %, а 15 % — зниження міцності до величин, недостатніх для забезпечення мінімальної марки цегли на стиск 100.

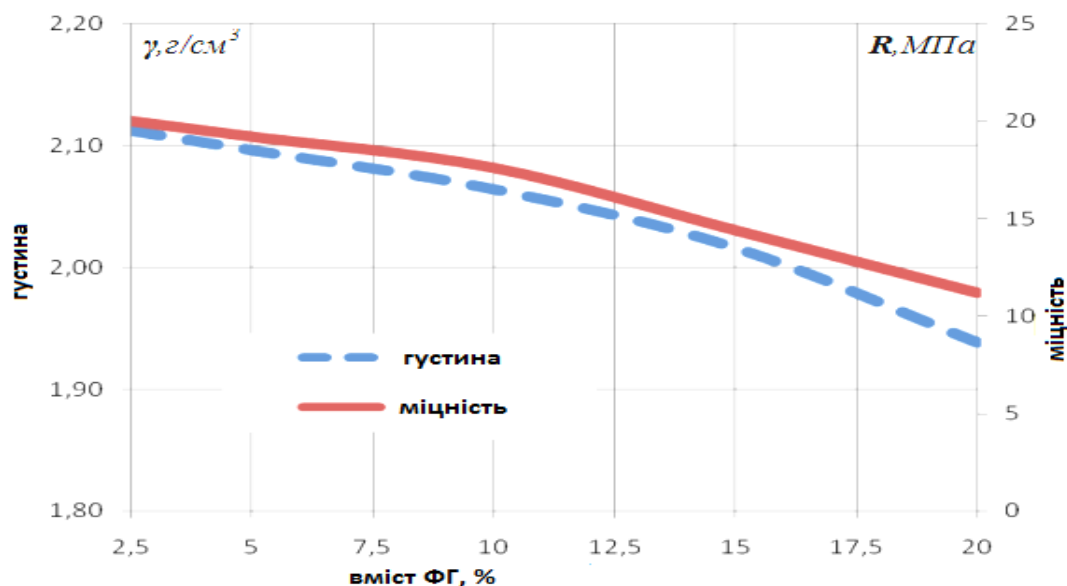


Рис. 7. Залежність міцності на стиск  $R$  і середньої густини  $\gamma$  пресованих сумішей від вмісту фосфогіпсу ФГ на 28 добу твердіння

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Пресована суміш із меленого доменного гранульованого шлаку і 2,5 % фосфогіпсу як активатора твердіння

забезпечила максимальні показники щільності та міцності на стиск 20 МПа, що є достатньо для формування пресованих дрібноштучних виробів, що можуть використовуватися як стінові матеріали.

### Список використаних джерел

1. Аналіз ризику стану екологічної безпеки України [Електронний ресурс] / А. Б. Качинський // Екологічна безпека України: Системний аналіз перспектив покращення. Сер. Екологічна безпека. – К.: Національний інститут стратегічних досліджень, 2001. – Ч.2. – Режим доступу: <http://old.niss.gov.ua/book/kachin/2-4.htm>.
2. Сталинский, Д. В. Основные направления по утилизации отходов металлургических предприятий [Текст] / Д. В. Сталинский, Г. М. Каненко // Экология и промышленность. – 2005. – № 4(5). – С. 10.
3. Остров, Е. И. Утилизация металлургических шлаков – резерв экономики [Электронный ресурс] / Е. И. Остров, Ю. В. Винокуров, В. И. Тихонов // ООО «Империя»: Официальный сайт. Статьи и заметки. – Режим доступа: [http://empire.dnx.ru/pressa\\_20.html](http://empire.dnx.ru/pressa_20.html).

4. Шлаки металлургического производства – эффективное сырьё для получения сухих строительных смесей [Электронный ресурс] / Н. А. Шаповалов, Л. Х. Загороднюк, И. В. Тикунова и др. // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-1. – С. 167-172. – Режим доступа: <https://www.fundamental-research.ru/ru/article/view?id=30913>.
5. Основания из активных шлаков доменных отвалов [Электронный ресурс] // Стройсправка.ру: Интернет-издание. – Режим доступа: <http://stroy-spravka.ru/article/osnovaniya-iz-aktivnykh-shlakov-domennykh-otvalov>.
6. ТУ У В.2.7.03450778.096-99. Шлаки дроблені для дорожнього будівництва.
7. ДСТУ Б В.2.7-35-95. Щебінь, пісок та щебенево-піщана суміш з доменних та сталеплавильних шлаків для загальнобудівельних робіт.
8. Спосіб виготовлення радіаційно безпечного шлакопортландцементу з використанням відвального доменного шлаку [Текст]: пат. 41223 UA МПК C04B7/14(2009.01) / Е.Б. Хоботова, М.І. Уханьова, Ю.С. Калмикова; власник ХНАДУ. – № У 2008 14552; заявл. 17.12.2008; опубл. 12.05.2009; Бюл. № 9.
9. Рунова, Р. Ф. Перспективные направления использования контактно-конденсационных вяжущих [Текст] / Р. Ф. Рунова, С. Е. Максунув // Цемент. – 1990. – № 6. – С. 8-10.
10. Мчедлов-Петросян, О. П. Особенности технологии бетона и управляемого структурообразования [Текст] / О. П. Мчедлов-Петросян. – М., 1977. – С. 220-226.
11. Ушеров-Маршак, А. Шлакопортландцемент и бетон [Текст] / А. Ушеров-Маршак, З. Гергичны, Я. Малолепши. – Харків: Колорит, 2004. – 159 с.
12. Глуховский, В. Д. О синтезе кристаллических алюмосиликатов [Текст] / В. Д. Глуховский, И. Ю. Петренко, Ж. В. Скурчинская // ДАН УССР. Сер. В. – 1968. – №5. – С. 791-735.
13. Шлакощелочные и щелочно-щелочноземельные гидравлические вяжущие и бетоны [Текст] / под ред. В. Д. Глуховского. – К.: Вища школа, 1979. – 232 с.
14. Глуховский, В. Д. Исследование и внедрение в производство шлакощелочных вяжущих, бетонов и конструкций на их основе [Текст] / В. Д. Глуховский, Г. С. Ростовская. – К.: Общ. «Знание», 1989. – 180 с.
15. Shi, C. Alkali-activated Cements and Concretes / C. Shi, P.V. Krivenko, D. Roy. London, NY: Taylor and Francis Group, 2006. - 376 p.
16. Rakhimova, N.R. Compositional slag-alkaline bindings / N.R. Rakhimova, R.Z. Rakhimov // 16. Internationale Baustofftagung, Tagungsbericht, Band 1, Weimar. 2006. - P. 1171-1176.
17. Кривенко, П. В. Физико-химические основы долговечности шлакощелочного камня [Текст] / П. В. Кривенко // Цемент. – 1990. - № 11. – С. 2-5.
18. Пушкарева, Е. К. Жаростойкие материалы на основе щелочных вяжущих систем [Текст]: автореф. дисс... д-ра техн. наук / Е. К. Пушкарева. – К.: КИСИ, 1995. – 40 с.
19. Будников, П. П. Гипс, его исследование и применение [Текст] / П. П. Будников. – М.: Госстройиздат, 1943. – 374 с.

---

Вінниченко Варвара Іванівна, д-р техн. наук, професор кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. +38 050 167 97 05. E-mail: [vvinnichenko@ukr.net](mailto:vvinnichenko@ukr.net).  
Буцький В'ячеслав Олександрович, канд. техн. наук, доцент кафедри механізації будівельних процесів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. +38 057 700 02 82.  
E-mail: [nutter@ukr.net](mailto:nutter@ukr.net).  
Костюк Тетяна Олександрівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів та виробів Харківського національного університету будівництва та архітектури. Тел. +38 057 706 20 73.  
E-mail: [takostuk@ukr.net](mailto:takostuk@ukr.net).

---

Плугін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор, зав. кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. +38 057 730 10 63.

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

Брайцев Дмитро, інженер, менеджер компанії «AUMUND Fördertechnik GmbH», Німеччина.

Tel.: +49 (0) 174 343 65 03. E-Mail: braizew@aumund.de.

Varvara I. Vinnichenko, DSc, Professor of Building Process Mechanization Department, Mechanics and Technology Faculty, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel. +38 050 167 97 05.

E-mail: vvinnichenko@ukr.net.

Viacheslav O. Butskii, PhD, Associate Professor of Building Process Mechanization Department, Mechanics and Technology Faculty, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel. +38 057 700 02 82.

E-mail: nutter@ukr.net.

Tetiana O. Kostiuk, DSc, Professor of Building Materials and Products Department, Construction Faculty, Kharkiv National University of Construction and Architecture. Tel.: +38 057 730-10-63. E-mail: takostuk@ukr.net.

Andrii A. Plugin, DSc, Professor, Head of Building Materials and Structures Department, Construction Faculty, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: +38 057 730-10-63. E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Dimitri Braizew, Area Sales Manager GUS AUMUND Fördertechnik GmbH, Saalhofer Str. 17, 47495 Rheinberg, Deutschland/Germany. Tel.: +49 (0) 174 343 65 03. E-Mail: braizew@aumund.de.

Стаття прийнята 16.08.2017 р.

УДК 691.533

### **ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ ТА ВОДОСТІЙКОСТІ ГІПСОВИХ В'ЯЖУЧИХ НАНОДИСПЕРСНИМИ МІНЕРАЛЬНИМИ ДОБАВКАМИ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін (УкрДУЗТ), д-р-інж. Х.-Б. Фішер (Веймарський АБУ), канд. техн. наук О. С. Борзяк, асп. А. С. Єфіменко (УкрДУЗТ), канд. техн. наук А. А. Жигло (ХНУМГ)

### **ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ВОДОСТОЙКОСТИ ГИПСОВЫХ ВЯЖУЩИХ НАНОДИСПЕРСНЫМИ МИНЕРАЛЬНЫМИ ДОБАВКАМИ**

Д-р техн. наук А. А. Плугін (УкрГУЖТ), д-р-інж. Х.-Б. Фішер (Веймарський АСУ), канд. техн. наук О. С. Борзяк, асп. А. С. Єфіменко (УкрГУЖТ), канд. техн. наук А. А. Жигло (ХНУГХ)

### **INCREASE OF STRENGTH AND WATER RESISTANCE OF GYPSUM BENDING BY NANODISPERSE MINERAL ADDITIVES**

DSc A. A. Plugin, D.Eng. H.-B. Fisher, PhD O. Borziak, graduate A. Iefimenko, PhD A. Zhyhlo

*Стаття присвячена дослідженню впливу мінеральних добавок на водостійкість будівельного гіпсу. Наведено результати експериментальних досліджень впливу добавок шлаку та нанодисперсного глинозему на міцність та водостійкість гіпсового каменю. Виконано електронно-мікроскопічні дослідження особливостей структури отриманого матеріалу. Установлено, що спільне введення в гіпс доменного гранульованого шлаку і нанодисперсного глинозему забезпечує підвищення міцності та водостійкості гіпсового каменю. За результатами електронно-мікроскопічних досліджень встановлено, що*

поліпшення фізико-механічних властивостей гіпсового каменю відбувається за рахунок ущільнення його структури та збільшення частки електрогетерогенних контактів.

**Ключові слова:** будівельний гіпс, водостійкість, нанодисперсний глинозем, доменний гранульований шлак.

*Статья посвящена исследованию влияния минеральных добавок на водостойкость строительного гипса. Приведены результаты экспериментальных исследований влияния добавок шлака и нанодисперсного глинозема на прочность и водостойкость гипсового камня. Выполнены электронно-микроскопические исследования особенностей структуры полученного материала. Установлено, что совместное введение в гипс доменного гранулированного шлака и нанодисперсного глинозема обеспечивает повышение прочности и водостойкости гипсового камня. По результатам электронно-микроскопических исследований установлено, что улучшение физико-механических свойств гипсового камня происходит за счет уплотнения его структуры и увеличения доли электрогетерогенных контактов.*

**Ключевые слова:** строительный гипс, водостойкость, нанодисперсный глинозем, доменный гранулированный шлак.

*The article is devoted to the investigation of the effect of mineral additives on the water resistance of building gypsum. The results of experimental studies of the effect of additives of slag and nanodispersed alumina on the strength and water resistance of gypsum stone are presented. Electron-microscopic studies of the structural features of the material obtained are performed. It has been established that the joint introduction into gypsum of blast-furnace granular slag and nanodispersed alumina provides an increase in the strength and water resistance of gypsum stone. According to the results of electron microscopic studies, it is established that the improvement of the physicomaterial properties of gypsum stone is due to the compaction of its structure and an increase in the proportion of electroheterogeneous contacts.*

**Keywords:** building gypsum, water resistance, nanodispersed alumina, blast-furnace granular slag.

**Вступ.** Гіпсові в'язучі речовини широко використовуються в будівництві, проте через певні недоліки галузь їх застосування обмежена приміщеннями із сухим і нормальним режимом. До основних недоліків гіпсового в'язучого можна віднести: недостатню водостійкість; недостатні експлуатаційні характеристики, слабку стійкість до стирання; недостатню міцність під дією навантаження, особливо у зволоженому стані. Тому підвищення водостійкості будівельного гіпсу залишається актуальним завданням.

Низька водостійкість гіпсових виробів обумовлена досить високою розчинністю двоводневого гіпсу (2,04 г/л при 20 °С). Крім того, вода, проникаючи в міжкристалічні порожнини гіпсового каменю,

адсорбується на твердих поверхнях, між якими виникає розклинювальний тиск, що розриває локальні контакти між кристалами. На сьогодні існує багато способів підвищення водостійкості гіпсу [1-3]: зниження водогіпсового відношення, використання полімерних добавок, просочення та гідрофобізація поверхонь гіпсового каменю, введення до складу в'язучого активних мінеральних добавок, що надають йому гідравлічних властивостей, утворюючи в процесі гідратації нерозчинні сполуки, а також добавок-мікронаповнювачів, що сприяють формуванню щільної структури гіпсового каменю. За даними [4-9] введення мінеральних добавок є найбільш ефективним та, одночасно, недорогим

способом підвищення водостійкості будівельного гіпсу.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Міцність гіпсового каменю визначають переважно електрогетерогенні контакти між кристалогідратами гіпсу зі слабкою міжмолекулярною взаємодією. Ці контакти руйнуються навіть при незначних напругах [4-9]. У гіпсовому камені є і деяка кількість електрогетерогенних контактів із сильним електростатичним притяганням між різнойменно зарядженими гранями кристалогідратів, однак істотної ролі в забезпеченні міцності і водостійкості вони не відіграють.

Для забезпечення водостійкості та збільшення міцності гіпсових в'язучих необхідно до їх складу вводити добавки, що сприяють виникненню дисперсної фази з негативним рівноважним електроповерхневим потенціалом [4, 8]. Введення в гіпсовий камінь доменного гранульованого шлаку, що має негативний поверхневий заряд, приведе до утворення значної кількості міцних і водостійких електрогетерогенних контактів з позитивно зарядженими гранями кристалогідратів гіпсу в структурі гіпсового каменю [5, 7].

Для збільшення щільності гіпсового каменю можливе також застосування нанодисперсних наповнювачів, які, вбудовуючись у структуру, заповнюють міжкристалічні порожнини і сприяють ущільненню структури [6, 7]. У такому випадку кількість і дисперсність наповнювачів підбирається таким чином, щоб утворювалися щільні упаковки частинок матриці в прошарках між структуроутворювальними частинками: кристалогідратів гіпсу – між частинками шлаку, нанодисперсних частинок – між кристалогідратами гіпсу [5, 7]. Крім того, нанодисперсні частинки наповнювача можуть служити центрами кристалізації, підвищуючи дисперсність кристалогідратів та ущільнюючи структуру.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Мета дослідження –

встановлення впливу добавок шлаку та нанодисперсного глинозему на фізико-механічні властивості та структуру гіпсового каменю. Завдання досліджень: експериментальне дослідження впливу добавок на фізико-механічні властивості гіпсового каменю, електронно-мікроскопічні дослідження особливостей структури отриманого матеріалу.

**Матеріали і методи дослідження.** Досліджено вплив нанодисперсних добавок на фізико-механічні властивості гіпсового каменю. В'язуча речовина – гіпс будівельний марки Г-10, добавки – основний доменний гранульований шлак ПАТ «ММК «Азовсталь», мелений до проходу крізь сито 008 не менше 85 % та мікронаповнювач – глинозем нанодисперсний (розмір часток 20-30 нм). Під час дослідження варіювався вміст компонентів: гіпсу (Г) – від 100 до 20 %, шлаку (Ш) – від 0 до 80 %, нанодисперсного глинозему (МН) – від 0 до 6 %, водо-тверде співвідношення (В/Т) – від 0,24 до 0,6. Склад та кількість добавок були визначені на основі [5, 6].

Для дослідження із суміші компонентів виготовляли зразки-балочки розміром 40×10×10 мм, на яких визначали міцність на стиск у сухому та водонасиченому стані та розраховували коефіцієнт водостійкості. Досліджено залежності: нормальної густоти гіпсового тіста від водо-твердого відношення; міцності на стиск у сухому й водонасиченому стані та коефіцієнта водостійкості від вмісту шлаку, нанодисперсного глинозему та водо-твердого відношення.

Електронно-мікроскопічні дослідження структури гіпсового каменю здійснювали на його відколах за допомогою скануючого електронного мікроскопа Philips XL 30 ESEM-FEG в інституті будівельних матеріалів ім. Ф. А. Фінгера Веймарського архітектурно-будівельного університету. Зйомку проводили під напругою 15 кВ.

**Результати дослідження.** Залежності міцності на стиск у сухому та водонасиченому стані, а також коефіцієнта водостійкості від вмісту шлаку та водо-твердого співвідношення наведені на рис. 1-3.

За даними випробувань встановлено, що найбільшу міцність мають зразки, що виготовлені із суміші гіпсу (Г) та шлаку (Ш) за  $V/T = 0,24$ . Однак при такому водо-твердому відношенні суміш є нетехнологічною. Встановлено, що гіпсо-шлакове тісто має нормальну густоту за  $V/T = 0,36$ .

За результатами визначення міцності в сухому стані найкращі показники мають зразки, у яких вміст шлаку становить 20 та 40 %, найкращий показник коефіцієнта водостійкості мають зразки, що містять 40 % шлаку ( $Ш/(Г+Ш) = 0,4$ ).

Тому для подальших досліджень впливу вмісту мікронаповнювача на міцність гіпсо-шлакову суміш готували при вмісті шлаку 40 % та  $V/T = 0,36$ .

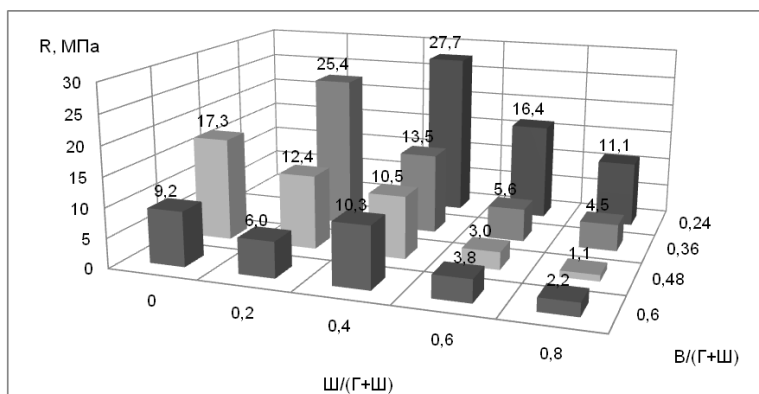


Рис. 1. Залежність міцності гіпсового каменю у сухому стані від вмісту шлаку (Ш/(Г+Ш)) та водо-твердого співвідношення (V/(Г+Ш))

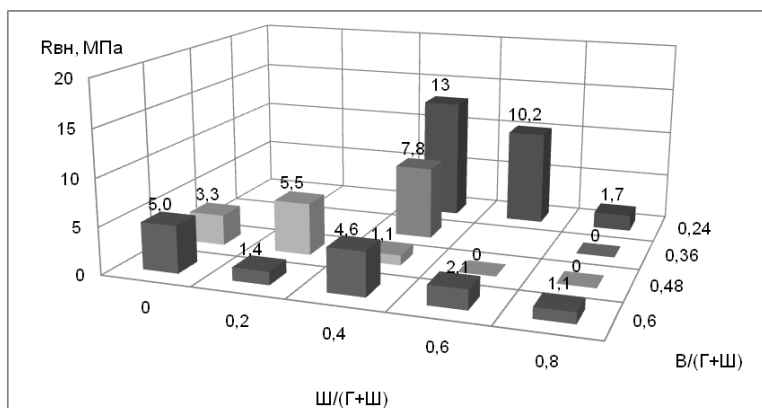


Рис. 2. Залежність міцності гіпсового каменю у водонасиченому стані від вмісту шлаку (Ш/(Г+Ш)) та водо-твердого співвідношення (V/(Г+Ш))

Залежність міцності у сухому стані гіпсо-шлакового каменю та його коефіцієнта водостійкості від вмісту мікронаповнювача наведено на рис. 4 та 5 відповідно.

За результатами досліджень встановлено, що нанодисперсний глинозем значно підвищує міцність гіпсо-шлакового каменю у сухому стані – майже на 60 % за вмісту



МН 2 та 6 % і на 9 % за вмісту МН 4 %. У разі уведення мікронаповнювача в кількості більше ніж 2 % коефіцієнт водостійкості

зростає. На рис. 6 наведені результати електронно-мікроскопічних досліджень.

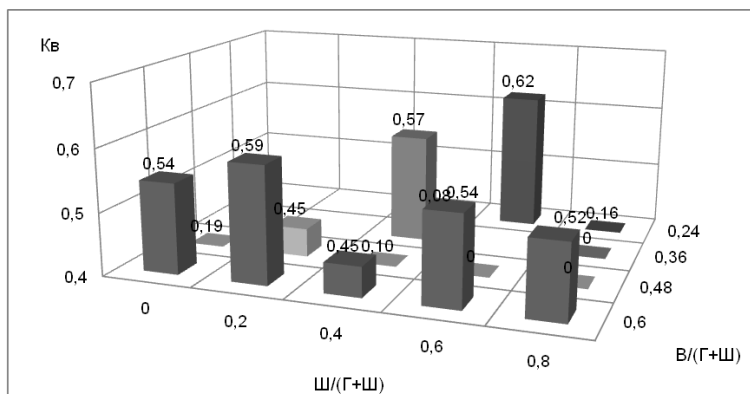


Рис. 3. Залежність коефіцієнта водостійкості від вмісту шлаку (Ш/(Г+Ш)) та водо-твердого співвідношення (В/(Г+Ш))

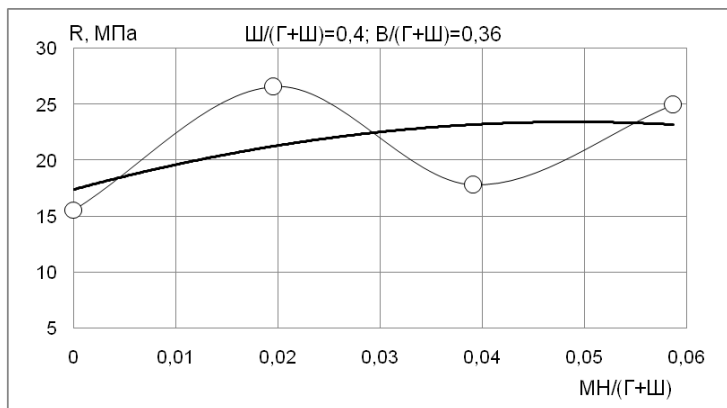


Рис. 4. Залежність міцності гіпсо-шлакового каменю у сухому стані від вмісту мікронаповнювача

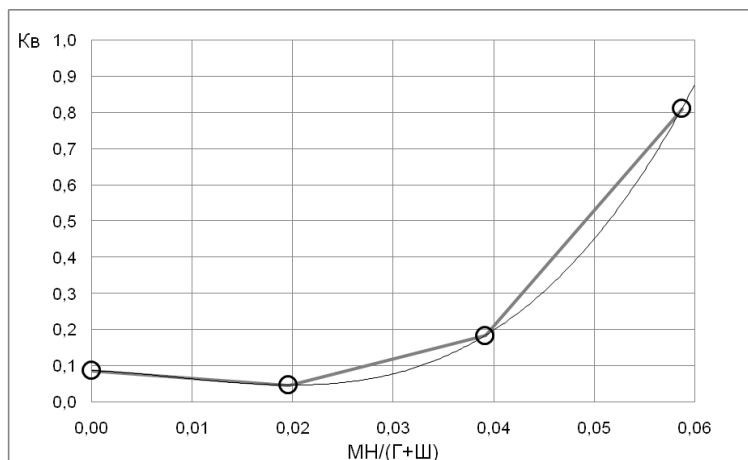


Рис. 5. Залежність коефіцієнта водостійкості гіпсо-шлакового каменю від вмісту мікронаповнювача

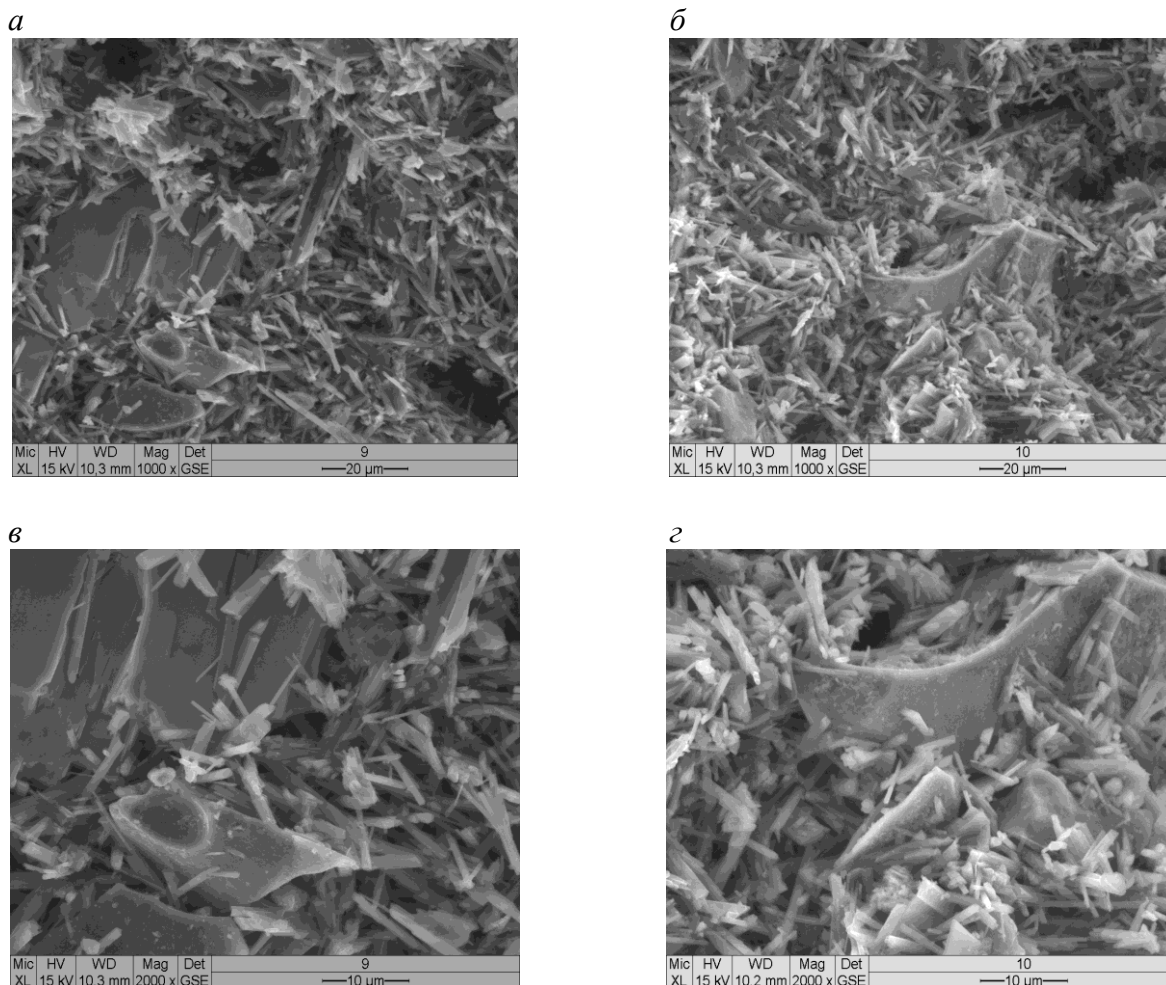


Рис. 6. Електронно-мікроскопічні знімки поверхні відколу гіпсо-шлакового каменю:  
 а –  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})=0,4$ ;  $\text{МН}=0$ ; збільшення  $\times 1000$ ; б –  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})=0,4$ ;  $\text{МН}=0,02$ ; збільшення  $\times 1000$ ;  
 в –  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})=0,4$ ;  $\text{МН}=0$ ; збільшення  $\times 2000$ ; г –  $\text{Ш}/(\text{Г}+\text{Ш})=0,4$ ;  $\text{МН}=0,02$ ; збільшення  $\times 2000$

Як видно на знімках, частки гіпсу розміщені на поверхні шлаку повздовжніми гранями, при цьому ознаки хімічної взаємодії між ними не спостерігаються. Структура зразків з мікронаповнювачем відрізняється тим, що кристали гіпсу мають менші розміри, спостерігаються також дрібнокристалічні агрегати, що певно формуються навколо часток мікронаповнювача, які є для них центрами кристалізації.

**Висновки.** Виконано експериментальні дослідження, у результаті яких установлено, що спільне введення в гіпс доменного гранульованого шлаку і нанодисперсного глинозему забезпечує значне підвищення міцності та водостійкості гіпсового каменю. За результатами електронно-мікроскопічних досліджень установлено, що поліпшення фізико-механічних властивостей гіпсового каменю відбувається за рахунок ущільнення його структури та збільшення частки електрогетерогенних контактів.

*Список використаних джерел*

1. Модифіковані гіпсові і сульфатно-шлакові в'язучі та матеріали на їх основі [Текст] / Л. Й. Дворкін, О. Л. Дворкін, А. В. Мироненко [та ін.]. – Рівне: НУВГП, 2011. – 188 с.
2. Белов, В. В. Современные эффективные гипсовые вяжущие, материалы и изделия [Текст] / В. В. Белов, А. Ф. Бурьянов, В. Б. Петропавловская. – Тверь: ТГТУ, 2007. – 132 с.
3. Гипсовые материалы и изделия (производство и применение) [Текст] / под ред. А. В. Ферронской. – М.: АСВ, 2004. – 488 с.
4. Механизм структурообразования и дегидратации гипсовых вяжущих [Текст] / А. Н. Плугин, Х.-Б. Фишер, А. А. Плугин [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 115. – С. 5-22.
5. Повышение водостойкости строительного гипса минеральными добавками [Текст] / А. А. Плугин, Ал. А. Плугин, Х.-Б. Фишер [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 122. – С. 227–236.
6. Plugin A.A. Increase of gypsum water resistance by mineral additives / A.A.Plugin, O.A.Plugin, H.-B.Fisher, G.N.Shabanova // 1 Weimarer Gipstagung, 30–31 März 2011, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2011. – N P21. – P.435–443.
7. Повышение водостойкости гипса добавками микронаполнителей [Текст] / А. А. Плугин, С. В. Воронин, О. С. Борзяк [и др.] // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА; ХОТВ АБУ, 2016. – №2 (84). – С. 239–242.
8. Plugin, A.N. The gypsum's structure and strength. The development of the concept about the structure / A.N.Plugin, A.A.Plugin, Yu.G.Gasan, Yu.A.Sukhanova // 2 Weimarer Gipstagung, 26–27 März 2014, Weimar: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2014. – N P59. – P.417–426.
9. Plugin, A.N. Structure and strength of gypsum: Mechanism of strength and water resistance / A.N.Plugin, A.A.Plugin, Yu.G.Gasan, H.-B.Fisher, O.A.Plugin // 2 Weimarer Gipstagung, 26–27 März 2014, Weimar, Bundesrepublik Deutschland: Tagungsbericht. – Weimar: FIB, Bauhaus–Universität Weimar, 2014. – N P60. – P.427–438.

---

Плугин Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор, зав. кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63.

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

Фишер Ханс-Бертрам, д-р-інженер, керуючий кафедри будівельних матеріалів, інститут будівельних матеріалів ім. Ф.А.Фінгера, Веймарський архітектурно-будівельний університет. Тел. +49(0)3643-584712.

E-mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de.

Борзяк Ольга Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Єфіменко Артем Сергійович, аспірант кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: a.efimenko03@gmail.com.

Жигло Анна Андріївна, канд. техн. наук, доцент кафедри технології будівельного виробництва і будівельних матеріалів Харківського національного університету міського господарства ім. О.М. Бекетова. Тел. (057) 707-31-10. E-mail: anna.baranova@kname.edu.ua.

Plugin Andrii A., DSc, Professor, Head of Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-68. E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Hans-Bertram Fisher, Dr.-Ing., Betriebsleitung, Professur Werkstoffe des Bauens, F.A.Finger–Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar. Tel. +49(0)3643-584712, E-mail: hans-bertram.fischer@uni-weimar.de.

Borziak Olga, PhD, associate professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-63. E-mail: borziak.olga@gmail.com.

Iefimenko Artem, graduate student, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel. (057)730-10-63. E-mail: a.efimenko03@gmail.com.

Zhyhlo Anna, PhD, associate professor, Department of Construction Technologies and Building Materials, O.M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv. Tel. (057) 707-31-10. E-mail: anna.baranova@kname.edu.ua.

Стаття прийнята 16.08.2017 р.

УДК 624.131:543.442.2

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЗАЄМОДІЙ КОМПОНЕНТІВ ГЛИНОВМІСНИХ МАТЕРІАЛІВ МЕТОДОМ ІНФРАЧЕРВОНОЇ СПЕКТРОСКОПІЇ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук О. С. Борзяк, інж. В. Ю. Савчук

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЙ КОМПОНЕНТОВ ГЛИНОСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ МЕТОДОМ ИНФРАКРАСНОЙ СПЕКТРОСКОПИИ

Д-р техн. наук Л. В. Трикоз, канд. техн. наук О. С. Борзяк, инж. В. Ю. Савчук

## STUDY OF INTERACTION OF CLAY-CONTAINED MATERIALS BY INFRARED-SPECTROSCOPY METHOD

DSc. L. Trykoz, PhD O. Borziak, eng. V. Savchuc

*У статті показано можливість створення композиційних матеріалів, до складу яких входять глинисті ґрунти та відходи виробництва. Як відходи було використано металургійні шлаки та активний мул станцій біологічного очищення міських стічних вод. Було досліджено особливості структури таких матеріалів методом інфрачервоної спектроскопії. Результати свідчать про утворення структури за рахунок іон-іонних взаємодій компонентів. Підтверджено можливість утворення продуктів гідратації шлаків без уведення лужних активаторів.*

**Ключові слова:** глиновмісний композиційний матеріал, шлак, активний мул, інфрачервона спектроскопія.

*В статье показана возможность создания композиционных материалов, в состав которых входят глинистые грунты и отходы производства. В качестве отходов были использованы металлургические шлаки и активный ил станций биологической очистки городских сточных вод. Были исследованы особенности структуры таких материалов методом инфракрасной спектроскопии. Результаты свидетельствуют об образовании структуры за счет ион-ионных взаимодействий компонентов. Подтверждена возможность образования продуктов гидратации шлаков без введения щелочных активаторов.*

**Ключевые слова:** глинодержащий композиционный материал, шлак, активный ил, инфракрасная спектроскопия.

*In the article a possibility of composition material creation is shown that contains clay soils and waste of produce. As the waste were used metallurgical slags and active sludge of biological treatment stations of urban wastewater. Structure features of such materials were researched by the infrared-spectroscopy method. Results indicate that the structure forms due to an ion-ion interaction of components. The formation possibility of hydration products of slags without alkali activator was confirmed. In the presence of slag, the active sludge acquires the properties of anionic surfactants. It is able to adsorb on positively charged surfaces of lime particles, and carbonate soil constituents. The slag addition contributes to the formation of an optimal sample structure with the placement of smaller particle sizes in layers between larger particles. The using of active sludge and slag provides an increasing of bearing capacity of the soil, an expansion of the*

*raw material base, an improving the ecological situation in cities, and the possibility of reuse of the stabilized soil.*

**Keywords:** *clay-contained composite material, slag, active sludge, infrared spectroscopy.*

**Вступ.** Композиційні матеріали на основі ґрунтів можуть застосовуватися в усіх галузях будівництва. Найбільш перспективним є їх використання для улаштування основ під дорожні покриття, теплоізолюючих, морозозахисних, капіляронеривних шарів, для укріплення верхніх шарів земляного полотна залізниць, виробничих майданчиків тощо. При цьому використання ґрунтів, оброблених різними в'язучими, є тільки одним із можливих технічних рішень інженерних завдань. Недоліком цих композицій є висока вартість, викликана високою витратою в'язучих – портландцементу, вапна та інших, для забезпечення необхідної міцності матеріалу, а також висока потреба в кондиційних мінеральних ґрунтах. Виходячи з економічних міркувань найбільше застосування в будівництві будуть мати композиційні матеріали на основі ґрунтів, у яких основну частину становлять відходи, що мають навіть слабо виражені в'язучі властивості.

Металургійні шлаки є продуктом технологічних процесів переробки, а також розпаду сталеплавильних і доменних шлаків. Шлаки активно реагують з водою і розчиненими в ній компонентами з підвищенням величини показника рН і виходом у розчин деяких шлакоутворювальних елементів. Процес гідролізу йде до утворення на поверхні шлакових зерен плівки вторинних мінералів, найважливішими серед яких є карбонати і гідросилікати кальцію. З формуванням останніх пов'язана притаманна шлакам, переважно доменного виробництва, здатність до самоцементації (гідравлічна активність шлаків). Аналіз даних про будівельні властивості металургійних шлаків України й досвіду використання їх у промислових, дорожніх та інших будівельних об'єктах показав широкий

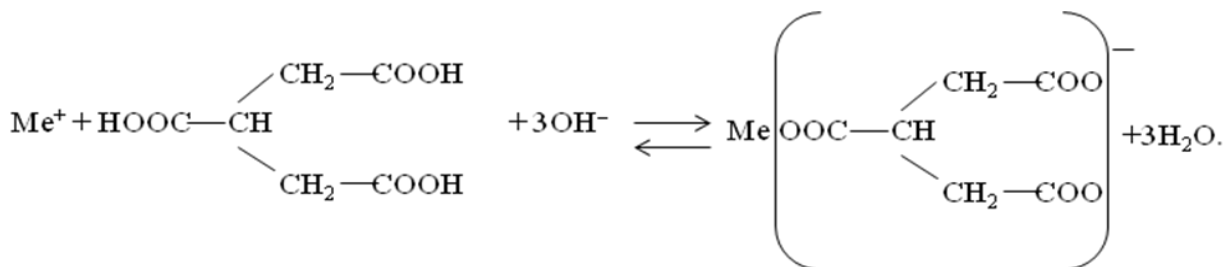
діапазон можливостей застосування їх замість природних кам'яних і ґрунтових матеріалів, а також бетонних елементів конструкцій.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Загальноприйнято, що шлаки тверднуть тільки за наявності активатора – лужного компонента. Однак у літературі описано випадки застосування шлаків і без активації [1-3]. На наш погляд, сповільнене у цьому випадку набирання міцності має свої переваги при повторному застосуванні вийнятого із котловану або траншеї ґрунту замість кондиційного, який привозиться. При цьому може бути здійснено попереднє змішування ґрунту зі шлаком, а потім зворотна засипка у котлован або траншею, де відбудеться твердіння композиції без руйнування конденсаційно-кристалізаційних зв'язків, які встигли б виникнути за наявності лужного активатора. Ще один недолік застосування лужного активатора, наприклад вапна, полягає в утворенні еtringіту, який призводить до руйнування мікроструктури композицій [4, 5]. Було з'ясовано у [6], що глюконова кислота ( $C_6H_{12}O_7$ ) є придатним уповільнювачем для таких композицій, яка сповільнює гідратацію щонайменше на 28 діб. Уповільнювач подовжує період гідратації та запобігає головним чином утворенню небажаних продуктів. Отже, органічні речовини можуть бути ефективними складовими таких композиційних матеріалів. Основна мета досліджень [7] полягала у визначенні можливості стабілізації ґрунтів та осаду стічних вод для отримання недорогого альтернативного матеріалу насипів шляхом додавання шлаків. Шлаки використовувалися як заміна слабого ґрунту при співвідношеннях 0, 25, 50, 75 та 100 %, коли осад стічних вод і ґрунт змішувалися зі шлаками окремо. Результати

лабораторних випробувань довели, що змішування шлаків з ґрунтом або осадом стічних вод покращує технічні властивості і що шлак може бути потенційно використаний як стабілізатор ґрунту.

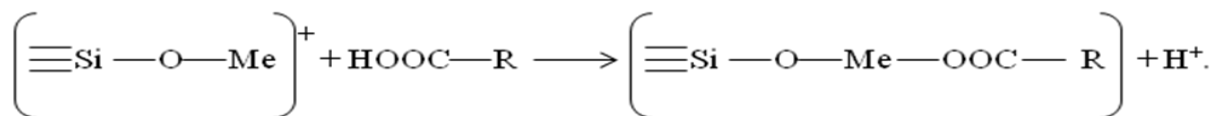
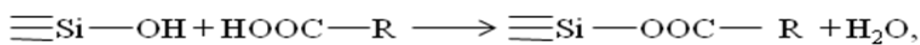
Активний мул біологічних очисних споруд стічних вод містить три складові: біологічну (мікроорганізми, найпростіші, водорості, гриби); органічну (нуклеїнові та амінокислоти, білки, полісахариди, гумусові кислоти та ін.); неорганічну (гідроксиди, фосфати, карбонати, силікати і т.д.), кожна з яких здатна зв'язувати іони металів доменного шлаку і глинистих

ґрунтів. Вивчення у [8] хімічного складу мулів показало, що основними компонентами мулів є полі- й моносахариди – 26%; амінокислоти й білковоподібні речовини – 28%, ліпіди – 17%, неорганічні сполуки – 28%. Найвність в оксикислотах і амінокислотах двох і більше функціональних груп (–ОН і –СООН, –NH<sub>2</sub> і –СООН і т.п.) сприяє зростанню їх комплексоутворювальних властивостей і взаємодії з гідроксильними групами, розташованими на поверхні глинистих частинок з утворенням просторової системи



Амінокислоти є кращими комплексоутворювачами в порівнянні з оксикислотами, так як група –NH<sub>2</sub> є сильнішим донором електронної пари, ніж гідроксидні –ОН. Природні амінокислоти, що входять до складу білків, зазвичай мають одну аміногрупу й одну карбоксильну групу. Кількість аміногруп визначає більш високу міцність

компонентів, тоді як кількість карбоксильних груп – одна чи дві – впливає мало. Значну спорідненість до твердої поверхні мають гуміноподібні речовини. Взаємодія гумусових кислот із силікатами й алюмосилікатами можлива за рахунок зв'язку карбоксилем гумінових речовин з ОН-групами адсорбенту або шляхом утворення мінеральних містків, наприклад



Участь в утворенні зв'язків між органічними речовинами з частинками доменного шлаку і глинистого ґрунту можуть брати азотвмісні групи органічних молекул. Значну роль в адсорбції органічних речовин силікатами,

алюмосилікатами й оксидами, напевне, відіграють водневі зв'язки. У їх утворенні беруть участь кисневі атоми або гідроксильні групи поверхні та гідроксильні або аміногрупи органічних молекул. Таким чином, у зв'язуванні мулом

доменного шлаку з частинками глинистого ґрунту беруть участь біологічна складова активного мулу, тобто мікроорганізми, які мають на своїй поверхні різні функціональні групи; органічна складова, у якій у зв'язуванні ґрунтового матеріалу основну роль відіграють білкові молекули і гуміно-подібні речовини; мінеральні компоненти мулу, силікати й алюмосилікати.

Вивченню можливостей активного мулу станцій біологічного очищення стічних вод у суміші зі шлаком бути стабілізатором ґрунту присвячено роботи [9, 10]. Установлено, що додавання активного мулу зменшує коефіцієнт стисливості зразків у 4 рази порівняно з глиною. У порівнянні із зразками, які містять 50 % активного мулу, зразки із додаванням 50 % шлаку, зменшують стисливість у 12 разів. Додавання в глину активного мулу дає змогу збільшити модуль деформації з 7,8 до 20,3 МПа, шлак підвищує цю величину до 52,7 МПа. При виготовленні композиційного матеріалу на основі глинистих ґрунтів функціональні групи активного мулу взаємодіють з гідроксильними групами, розташованими на поверхні глинистих частинок, з утворенням просторової структури. Крім того, введення активного мулу сприяє пептизації – руйнуванню агрегатів ґрунту й утворенню контактів між окремими частинками, що й призводить до зменшення стисливості зразків за рахунок зменшення загальної пористості. Додавання шлаку сприяє утворенню оптимальної структури зразків з розміщенням менших за розмірами частинок у прошарках між більшими частинками. Зміна структури викликає

зміну певною мірою типу хімічного зв'язку. Таким чином, це може бути зафіксовано при дослідженні інфрачервоних спектрів зразків.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою дослідження є підтвердження описаного вище механізму взаємодії функціональних груп активного мулу з поверхневими іонами шлаку та ґрунту на основі отриманих інфрачервоних спектрів зразків композиційних матеріалів. Це зумовлює такі завдання дослідження: зіставити спектри вихідних матеріалів та кінцевих сумішей; виявити та проаналізувати зміни, які відбуваються в смугах поглинання валентних та деформаційних коливань відповідних елементів; знайти ознаки лужної активації шлаків при додаванні активного мулу; порівняти види та кількість новоутворень у композиційних матеріалах.

**Матеріали і методи дослідження.** Зразки для досліджень готували шляхом перемішування глинистого ґрунту з активним мулом у пропорційному відношенні за масою 1:1. Оптимальність такого співвідношення було встановлено попередніми дослідженнями [11]. У підготовлену таким чином суміш додавали кислий (табл. 1) або основний (табл. 2) шлак у співвідношенні за масою 1:1. Склад активного мулу наведено в табл. 3. Тобто неорганічна частина активного мулу має склад, ідентичний хімічному складу більшості металургійних шлаків. Із суміші глини, води, активного мулу та шлаків було виготовлено зразки, які після витримання в нормальних умовах протягом 7 діб було досліджено методом інфрачервоної спектроскопії.

Таблиця 1

Хімічний склад кислого шлаку

Оксид	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MnO	FeO	TiO <sub>2</sub>
Вміст, %	5,72	18,02	38,44	1,43	44,17	0,25	0,47	0,64

Таблиця 2

## Хімічний склад основного шлаку

Оксид	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	CaO	MnO	FeO	TiO <sub>2</sub>
Вміст, %	14,36	7,51	31,23	2,2	31,75	2,2	1,5	0,34

Таблиця 3

## Хімічний склад мінеральної частини активного мулу, відсоток до абсолютно сухої речовини

Оксид	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	ZnO+CuO+ +NiO+Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Вміст, %	7-35	7-27	7-20	8-17	1,6-11	0,5-4	1,5-8,5	1,5-7	0-6

Підготовку зразків до дослідження здійснювали в такій послідовності: зразок висушували до постійної маси при температурі  $70 \pm 3$  °С, подрібнювали до розміру  $0,5 \div 1,0$  мм, видаляли великі частинки і розтирали в агатовій ступці до повного проходження через сито з розмірами отворів 0,063 мм. Інфрачервоні (ІЧ) спектри поглинання отримували за допомогою інфрачервоного Фур'є-спектрометра Bruker Alpha. Цей прилад підключається до комп'ютера і за допомогою програми OPUS ІЧ-спектри в графічному вигляді відображаються на екрані монітора і записуються в пам'ять комп'ютера. Діапазон довжин інфрачервоних хвиль  $400-4000$  см<sup>-1</sup>. Зразки для цього дослідження, відібрані й оброблені за описаною вище методикою, у вигляді порошку засипали в прес-форму і під тиском  $8 \div 8,5$  МПа запресовували в таблетки з додаванням КВг. ІЧ-спектри ідентифікували за [12].

**Результати дослідження.** Для виявлення змін, що відбулися в структурі глинистих матеріалів, було виконано такі експерименти. Аналізувалася структура зразків вихідної глини (рисунок, зразок 1), суміші глини і кислого (рисунок, зразок 2) або основного (рисунок, зразок 3) шлаку, суміші глини й активного мулу (рисунок, зразок 4), суміші «глина + активний мул + шлак кислий» (рисунок, зразок 5), суміші

«глина + активний мул + шлак основний» (рисунок, зразок 6), активного мулу (рисунок, зразок 7), шлаку кислого (рисунок, зразок 8), шлаку основного (рисунок, зразок 9). Про структурні зміни судили за інфрачервоними спектрами зазначених зразків. Було проаналізовано зміну спектрів поглинання, характерних для С–О ( $1410-1450$  і  $875-880$  см<sup>-1</sup>), валентних коливань Si–O–Si тетрадрів кремнієкисневого каркаса ( $1094-1108$  см<sup>-1</sup>), валентні та деформаційні Si–O і Si–O–Si коливання тетрадрів кремнієкисневого каркаса ( $1200-1100$  і  $530-460$  см<sup>-1</sup>), Si–O–Si коливання кілець SiO<sub>4</sub>-тетрадрів ( $830-750$  см<sup>-1</sup>), деформаційні коливання зв'язків Me–O ( $467$  і  $524$  см<sup>-1</sup>), ОН-валентні і деформаційні коливання вільної та зв'язаної води ( $3100-3500$  і  $1580-1680$  см<sup>-1</sup>).

Порівнюючи спектри вихідних шлаків (рисунок, зразки 8 і 9), бачимо, що вони мають схожі смуги в області високих хвильових чисел ( $2500-4000$  см<sup>-1</sup>), що характеризують валентні коливання ОН-груп, а також в області  $1250-1400$  см<sup>-1</sup>, що характеризують деформаційні коливання ОН-груп. Низькохвильовою частиною (менше за  $2000$  см<sup>-1</sup>) спектри відрізняються. Так, спектр основного шлаку відрізняється більшою чіткістю смуг в областях поглинання  $729$  і  $619$  см<sup>-1</sup>, це означає, що більша кількість зв'язків Si–O в тетраедри SiO<sub>4</sub> обумовлена впливом катіонів металів, що узгоджується з різним



хімічним складом шлаків (табл. 1, 2). Також спостерігається зсув смуги, яка відповідає деформаційним коливанням Al–O, у бік низьких частот ( $467\text{ см}^{-1}$  для кислого шлаку і  $478\text{ см}^{-1}$  для основного).

Аналізуючи зразок глини з активним мулом (рисунок, зразок 4), бачимо, що основна відмінність міститься у високочастотній частині спектра. У порівнянні із зразками чистої глини (рисунок, зразок 1) і чистого активного мулу (рисунок, зразок 7) відбувається сильне зменшення оптичної щільності смуг поглинання  $3400$ ,  $2924$ ,  $1640$  і  $1430\text{ см}^{-1}$ . Розташування смуг у цих інтервалах визначається не будовою OH-груп, а силою утворених ними водневих зв'язків. Інтервал частот деформаційних коливань гідроксильних груп поширюється від довгих хвиль до  $1500\text{ см}^{-1}$ , деформаційних коливань молекул води в інтервалі до  $1580$ – $1680\text{ см}^{-1}$ , одного з деформаційних коливань іона  $\text{H}^{3+}$  – в інтервалі  $1680$ – $1800\text{ см}^{-1}$ . Отже, структуру зразків з глини й активного мулу формують слабкі водневі зв'язки, що підтверджується низькою міцністю і водонестійкістю зразків.

Спектри зразків глини з двома видами шлаку (рисунок, зразки 2 і 3) відрізняються смугами поглинання в областях  $1000$  і  $500$ – $800\text{ см}^{-1}$ , які стосуються коливань Si–O–Si або Si–O–Me. Для зразків глини з основним шлаком ці смуги більш інтенсивні й чіткі, що означає більшу впорядкованість структури.

При аналізі зразків глини з активним мулом і двома видами шлаків (рисунок, зразки 5 і 6) спостерігається повний збіг спектрів у високочастотній області зі зменшенням смуг поглинання, які характеризують валентні й деформаційні коливання OH-груп (широка несиметрична смуга в області  $3200$ – $3500\text{ см}^{-1}$ ), у тому числі адсорбована, координувана й гідроксильна ( $2923$ ,  $2853\text{ см}^{-1}$ ) вода, в порівнянні із зразками чистої глини (рисунок, зразок 1) і активного мулу (рисунок, зразок 7). Зникнення смуг

активного мулу в спектрі (рисунок, зразок 7), характерних для різного виду зв'язків C–O, C–O–H, C–C, C–H ( $1630$ ,  $1416$ ,  $1384\text{ см}^{-1}$ ), означає адсорбцію органічної складової активного мулу та її взаємодію з поверхневими іонами частинок глини і шлаку. Положення смуги  $1035\text{ см}^{-1}$ , яка відповідає за коливання зв'язку Si–O в тетраедрі  $\text{SiO}_4$ , залишається незмінним, хоча збільшується її інтенсивність. Відсутність Si–O-валентних смуг (область  $1000$ – $900\text{ см}^{-1}$ ) свідчить про іонний характер зв'язку між структурними одиницями.

Що стосується низькочастотної частини спектра, то порівнюючи зразки глини з активним мулом і двома видами шлаків (рисунок, зразки 5 і 6), можна встановити таке. Вид смуг поглинання в основному однаковий, проте вони відрізняються інтенсивністю й невеликим зсувом один щодо одного, що означає виникнення подібних продуктів взаємодії глини, шлаку й активного мулу, хоча і в різних співвідношеннях. На спектрах зразків 5 і 6 (рисунок) смуги, які характерні для деформаційних коливань Si–O–Si, не збігаються, це говорить про те, що гель сформовано з різним Si/Al співвідношенням. Точне положення цієї смуги визначається Si/Al співвідношенням у продуктах реакції та особливо координаційним числом атомів Al. Заміна Si на Al приводить до зміщення відповідної смуги в область менших значень хвильових чисел. Наявність смуг  $469$  і  $470\text{ см}^{-1}$ , що стосуються до деформаційних коливань Al–O, свідчить про лужну активацію шлаків, більш виражену для основного шлаку. Поява в зразку 5 (рисунок) смуг  $779$  і  $693\text{ см}^{-1}$ , відсутніх у вихідному шлаку (рисунок, зразок 8), викликано в цьому типі структур лужною активацією. Взаємодія з двовалентними іонами металів, що входять до складу активного мулу і шлаку, підтверджується переміщенням смуг до більш низьких частот у результаті зростання середньої відстані Me–O та іонного характеру зв'язку.

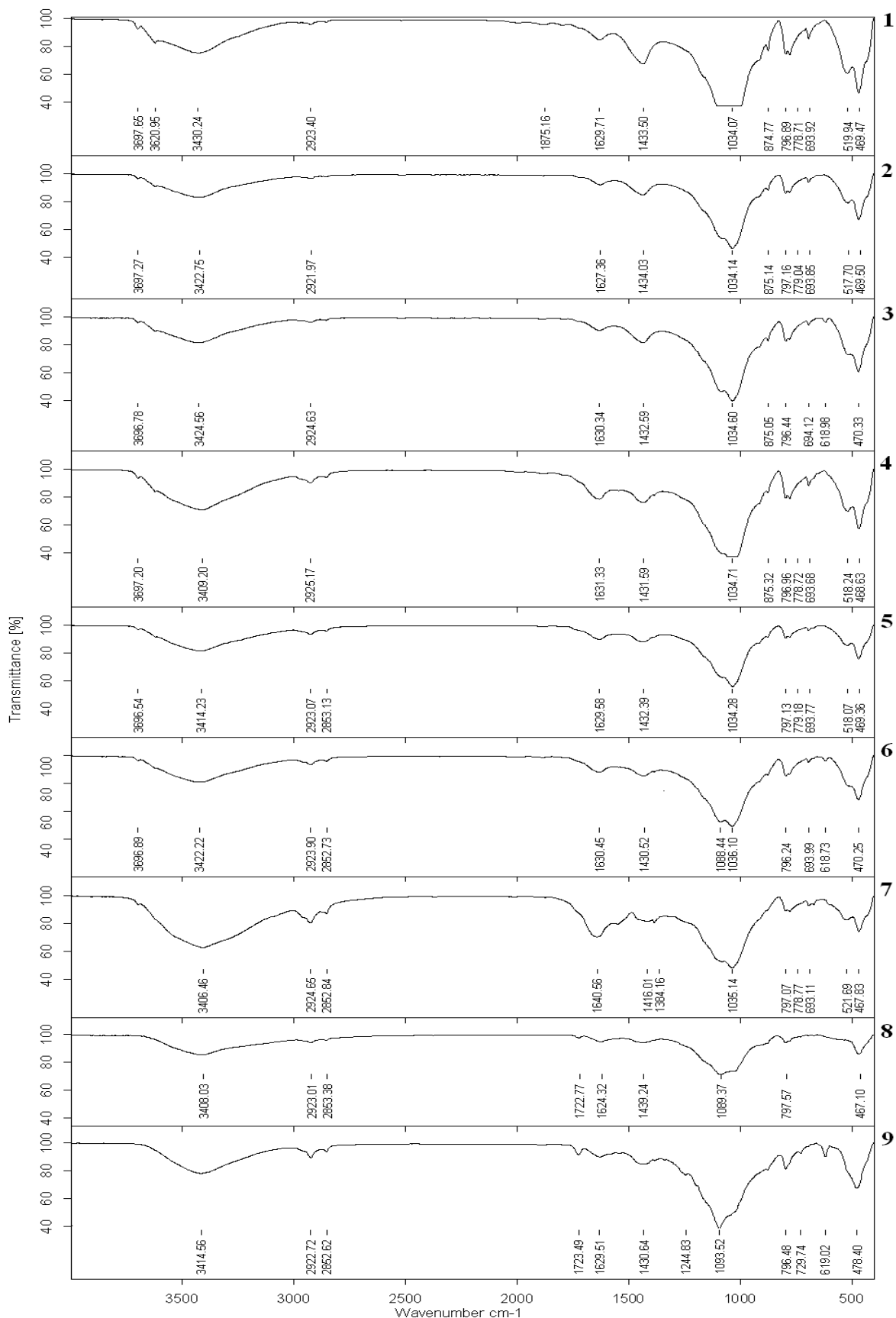


Рисунок. ІЧ-спектри зразків

Активний мул за певних умов (дисоціації карбоксильних груп і аміногруп білків з утворенням гідроксильних іонів) може бути лужним активатором твердіння шлаку. З часом міцність матеріалу збільшується, що є типовим для всіх шлаковмісних матеріалів. Указані процеси і реакції перетворюють ґрунт, у результаті чого виникає ґрунтовий матеріал з новими будівельними властивостями.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Білки є амфотерними поверхнево-активними речовинами (ПАР) за рахунок здатності функціональних груп  $-COOH$ ,  $-NH_3OH$  у залежності від рН по різному дисоціювати й утворювати за низьких рН органічний катіон ( $R-COOH \rightarrow R-CO^+ + OH^-$ ;  $R-NH_3OH \rightarrow R-NH_3^+ + OH^-$ ), а за високих рН – органічний аніон ( $R-COOH \rightarrow R-COO^- + H^+$ ;  $R-NH_3OH \rightarrow R-NH_3O^- + H^+$ ). У присутності шлаку, з якого в результаті гідратації виділяється вапно, білки та відповідно активний мул набувають властивості аніонної ПАР і здатності адсорбуватися на позитивно заряджених поверхнях часток вапна, карбонатних складових ґрунту. Це дає змогу застосувати активний мул як іоногенну поверхнево-активну речовину з метою підвищення міцності ґрунтових матеріалів. Уведення аніонактивної ПАР

сприяє також пептизації – руйнуванню агрегатів ґрунту й утворенню контактів між окремими частинками. Крім того, адсорбована ПАР утворює на гідрофільних мінеральних частках гідрофобні оболонки, зменшуючи водопроникність та збільшуючи морозостійкість кінцевого ґрунтового матеріалу. Додавання шлаку сприяє утворенню оптимальної структури зразків з розміщенням менших за розмірами частинок у прошарках між більшими частинками. Застосування активного мулу і шлаку забезпечує підвищену несучу здатність ґрунту, розширення сировинної бази для його отримання з одночасним поліпшенням екологічної ситуації в містах, забезпечує можливість вторинного використання закріпленого ґрунту.

Таким чином, фізико-хімічні дослідження підтвердили теоретичні уявлення про можливість створення композиційних матеріалів на основі глинистих ґрунтів, активного мулу і шлаків. Підтверджено можливість утворення продуктів гідратації шлаків без уведення лужних активаторів. Сформульовані гіпотези є підґрунтям для розроблення фізико-математичних моделей зміни властивостей нестійких ґрунтів на основі розвинених у дослідженні принципів фізико-хімічної механіки дисперсних систем і матеріалів.

### Список використаних джерел

1. Kaneko, T. Effect of sand content on stabilization of dredged soil-steel slag mixture / T. Kaneko, Y. Watabe // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 302-305. Available from: <http://dx.doi.org/10.3208/jgssp.jpn-120>.
2. Oh, M. Evaluation on the compressive strength of dredged soil-steel slag / M. Oh, G. L. Yoon, Y. W. Yoon // Japanese Geotechnical Society Special Publication. – 2016. – Vol. 2. – Iss. 6. – P. 298–301. Available from: <http://dx.doi.org/10.3208/jgssp.kor-12>.
3. Perná, I. The setting time of a clay-slag geopolymer matrix: the influence of blast-furnace-slag addition and the mixing method / I. Perná, T. Hanzlíček // J. of Cleaner Production. – 2016. – Vol. 112. – P. 1150–1155. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.069>.
4. Kavak, A. Reuse of Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBFS) in Lime Stabilized Embankment Materials / A. Kavak, G. Bilgen // Intern. J. of Engineering and Technology. – 2016. – Vol. 8. – Iss. 1. – P. 11–14. Available from: <http://dx.doi.org/10.7763/ijet.2016.v6.850>.

5. Islam, S. 1-D Compression Behaviour of Acid Sulphate Soils Treated with Alkali-Activated Slag / Shahidul Islam, Asadul Haque, Ha Hong Bui // *Materials*. – 2016. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 289-302. Available from: <http://dx.doi.org/10.3390/ma9040289>.

6. Schneider, N. The effect of D-gluconic acid as a retarder of ground granulated blast-furnace slag pastes / Nick Schneider, Dietmar Stephan // *Construction and Building Materials*. – 2016. – Vol. 123. – P. 99-105. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.127>

7. Kaya, Z. Effect of slag on stabilization of sewage sludge and organic soil / Zulkuf Kaya // *Geomechanics and Engineering*. – 2016. – Vol. 10. – Iss. 5. – P. 689-707. Available from: <http://dx.doi.org/10.12989/gae.2016.10.5.689>.

8. Зыкова, И. В. Обезвреживание избыточных активных илов и осадков сточных вод от тяжелых металлов [Текст]: автореф. дис. ... д-ра хим. наук: 03.0016 "Экология" / И. В. Зыкова. – С.Пб., 2008. – 32 с.

9. Трикоз, Л. В. Дослідження деформаційних характеристик ґрунтового матеріалу з використанням відходів [Електронний ресурс] / Л. В. Трикоз, В. Ю. Савчук // *Наука та прогрес транспорту: Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту ім. акад. А. В. Лазаряна: науковий журнал*. – 2017. – № 2 (68). – С. 166-172. – Режим доступу: <http://dx.doi.org/10.15802/stp2017/100249>.

10. Investigation into Electrical Conductivity of the Multicomponent System of Trackbed / L. V. Trykoz, I. V. Bagiyanc, V. Yu. Savchuk [et al.] // *Intern. J. of Engineering Research in Africa*. – 2016. – Vol. 25. – P. 52–57. Available from: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.25.52>.

11. Трикоз, Л. В. Застосування активного мулу станцій біологічного очищення для стабілізації ґрунтів [Текст] / Л. В. Трикоз, В. Ю. Савчук // *Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізн. трансп.* – Харків: УкрДАЗТ, 2014. – Вип. 148. – Ч. 2. – С. 58-62.

12. Накамото, К. ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений [Текст]: пер. с англ. / К. Накамото. – М.: Мир, 1991. – 536 с.

---

Трикоз Людмила Вікторівна, д-р техн. наук, професор кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Борзяк Ольга Сергіївна, канд. техн. наук, доцент кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: borziak.olga@gmail.com ORCID 0000-0002-8815-6936.

Савчук Валентина Юріївна, здобувач кафедри будівельних матеріалів, конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057)730-10-63. E-mail: kalmukova27@ukr.net ORCID 0000-0001-5971-5041.

Trykoz Liudmyla, doct. of techn. sciences, professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. (057)730-10-68. E-mail: lvtrikoz@ukr.net ORCID 0000-0002-8531-7546.

Borziak Olga, PhD, associate professor, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. (057)730-10-63. E-mail: borziak.olga@gmail.com ORCID 0000-0002-8815-6936.

Savchuc Valentyna, graduate student, Building Materials and Structures Department, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. Tel. (057)730-10-63. E-mail: kalmukova27@ukr.net ORCID 0000-0001-5971-5041.

Стаття прийнята 16.08.2017 р.

УДК 691.55:699.887

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЗЕМЛЕНИХ ЕКРАНІВ ІЗ ЕЛЕКТРОПРОВІДНИХ КОМПОЗИЦІЙ ЯК СПОСОБУ ЗАХИСТУ ВІД ЕЛЕКТРОКОРОЗІЇ

Д-р техн. наук А. А. Пługін, канд. техн. наук О. А. Пługін,  
інженери В. В. Касьянов, д-р техн. наук Д. А. Пługін (УкрДУЗТ),  
В. В. Конєв (ПАТ «Укрзалізниця»)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАЗЕМЛЕННЫХ ЭКРАНОВ ИЗ ЭЛЕКТРОПРОВОДНЫХ КОМПОЗИЦИЙ КАК СПОСОБА ЗАЩИТЫ ОТ ЭЛЕКТРОКОРРОЗИИ

Д-р техн. наук А. А. Пługин, канд. техн. наук Ал. А. Пługин,  
инженеры В. В. Касьянов, д-р техн. наук Д. А. Пługин (УкрГУЖТ),  
В. В. Конев (ПАТ «Укрзалізниця»)

## RESEARCH OF GROUNDED SCREEN FROM CONDUCTIVE COMPOSITIONS AS A STRUCTURES ELECTRO-CORROSION PROTECT

DSc A. A. Plugin, PhD O. A. Pluhin, engineer V. V. Kasyanov,  
engineer V. V. Konev, DSc D. A. Plugin

*Досліджували застосування заземлених екранів-покрить із композицій з графітовим наповнювачем на основі портландцементу і на основі силікату натрію як засобу захисту споруд від електрокорозії струмами витоку. Була розроблена оригінальна методика, що полягає у порівнянні сили струму крізь арматуру і бетон моделей споруди без захисту та із захистом заземленим екраном-покрить. Експериментально підтверджена ефективність заземлених екранів для захисту конструкцій, наприклад пасажирських платформ, від корозії струмами витоку. Установлено, що захисні властивості екрана залежать від відсотка площі контакту сталевого електрода заземлення з ним – зі збільшенням цього відсотка сила струму крізь бетон і арматуру знижується, а крізь захисний екран зростає.*

**Ключові слова:** струми витоку, електрокорозія, захист, портландцемент, силікат натрію, графіт, електропровідна композиція, заземлення.

*Исследовали применение заземленных экранов-покрытий из композиций с графитовым наполнителем на основе портландцемента и на основе силиката натрия как средства защиты сооружений от электрокоррозии токами утечки. Была разработана оригинальная методика, заключающаяся в сравнении величин силы тока через арматуру и бетон модели сооружения без защиты и с защитой заземленным экраном-покрытием. Экспериментально подтверждена эффективность заземленных экранов для защиты конструкций, например пассажирских платформ, от коррозии токами утечки. Установлено, что защитные свойства экрана зависят от процента площади контакта стального электрода заземления с ним – с повышением этого процента сила тока в бетоне и арматуре снижается, а в защитном экране – возрастает.*

**Ключевые слова:** токи утечки, электрокоррозия, защита, портландцемент, силикат натрия, графит, электропроводная композиция, заземление.

*The use of grounded screens — coatings from compositions with graphite filler based on Portland cement and on the basis of sodium silicate as a means of protecting structures from electrocorrosion by leakage currents was investigated. An original technique, which consists in*

*comparing the magnitude of the current through the armature and concrete of the model of the structure without protection and with protection by a grounded shield-coating was developed. The effectiveness of earthed shields to protect structures, such as passenger platforms, from corrosion by leakage currents has been confirmed experimentally. It is established that protection by an earthed shield provides a reduction in the current in the concrete and armature of the model due to the flow of its most part by a protective shield. The protecting properties of the screen depend on the percentage of the contact area of the steel electrode grounding with it - with increasing this percentage, the current strength in concrete and reinforcement decreases, and through the shielding screen increases. If the screen is used with a percentage of the contact area of the earth electrode with it up to 4,3 %, the current in concrete and armature is reduced by 75 - 80 %.*

**Keywords:** leakage currents, electrocorrosion, protection, portland cement, sodium silicate, graphite, conductive composition, grounding.

**Вступ.** Згідно з [1-5] конструкції і споруди на електрифікованих постійним струмом залізницях та біля інших джерел зазнають електрокорозії. Кородують переважно металеві конструкції та арматура залізобетону. У [2] зазначається, що біля арматури корозії зазнає також і бетон. У [6-9] було встановлено, що електрокорозія бетону відбувається не тільки біля арматури, але навіть у неармованих конструкціях і розчині кам'яної кладки та полягає в інтенсивному електроміграційному вилугуванні цементного каменю під впливом пульсуючого однонаправленого електричного потенціалу. Цей потенціал створюється під час проходження поїздів електрифікованою постійним струмом залізничною колією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У [8, 10] було запропоновано для захисту від електрокорозії конструкцій водопропускної труби застосувати діодне заземлення металоін'єкційної сорочки. Така сорочка застосована для ремонту пошкоджених конструкцій труби (рис. 1, а, б). Металоін'єкційна обшивка сорочки захищає бетон і розчин від карбонізації і вилугування, цементний камінь бетону — обшивку зсередини від електрохімічної корозії. Проте за впливу струмів витoku металева обшивка сорочки зазнає електрокорозії, що відбувається в анодних зонах (рис. 1, в). Її заземлення через діод дає змогу захистити як саму обшивку від електрокорозії за рахунок

перенесення анодних ділянок на заземлення, так і бетон і розчин конструкцій труби від протікання струму (рис. 1, г).

Проте металоін'єкційна сорочка — дорога конструкція, яку доцільно застосовувати за необхідності відновлення несучої здатності споруди із суттєвими пошкодженнями. З метою здешевлення ремонту та захисту споруд в УкрДУЗТ запропоновано замінити металоін'єкційну сорочку заземленим екраном-покриттям із електропровідної композиції на основі мінеральних в'язучих (рис. 2) [11], розроблені склади композицій на основі портландцементу [12] та отвердженого кремнійфтористим натрієм силікату натрію [13], з наповнювачем — графітовим порошком.

В [11] була розроблена методика й виконані експериментальні дослідження ефективності такого захисту від електрокорозії на моделях. Установлено, що у порівнянні з моделлю без захисту величина струму, що протікає через неї, менша: у моделі із заземленим екраном-покриттям із композиції на основі портландцементу — на 49-66 %, а з композиції на основі силікату натрію — на 34-60 %. За результатами досліджень було припущено, що захисні властивості заземленого екрана залежать також від відсотка площі контакту сталевого електрода заземлення з екраном із електропровідної композиції і мають збільшуватися зі збільшенням цього відсотка.

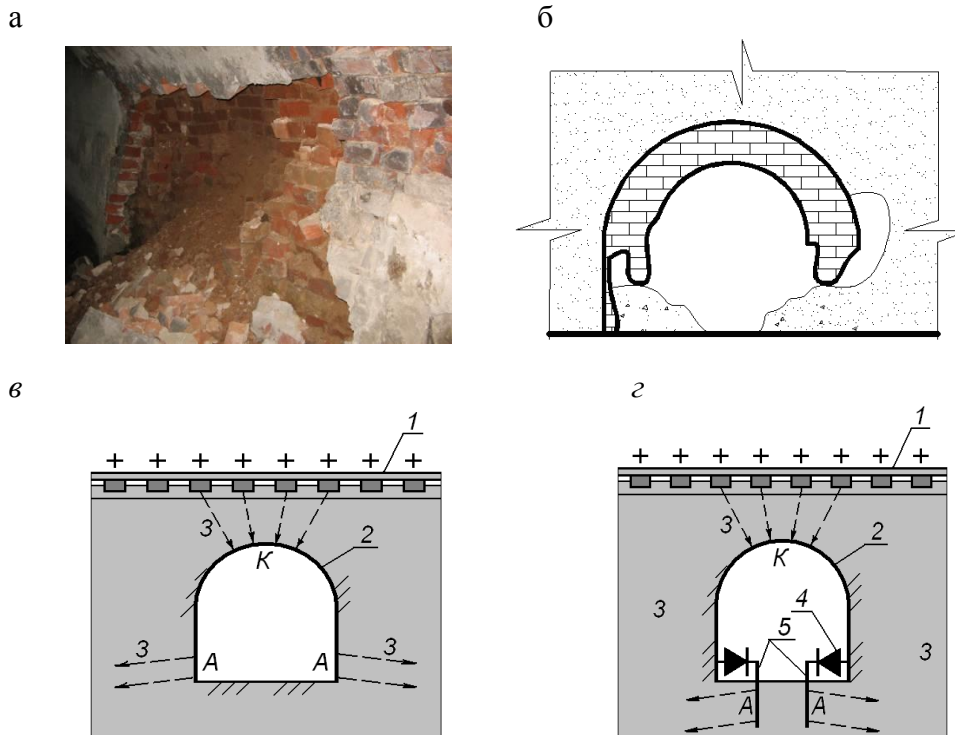


Рис. 1. Ремонт і захист від електрокорозії водопропускної труби у залізничному насипі: а, б – пошкодження у вигляді вивалів; в, з – схема протікання струму витoku з рейок через незахищену (в) і захищену діодним заземленням (з) металоін’єкційну сорочку: 1 – рейкова колія; 2 – металоін’єкційна сорочка; 3 – струми витoku; 4 – вентиль (діод) захисного улаштування; 5 – стержень заземлення; К – катодна зона; А – анодна зона (корозійно небезпечна)

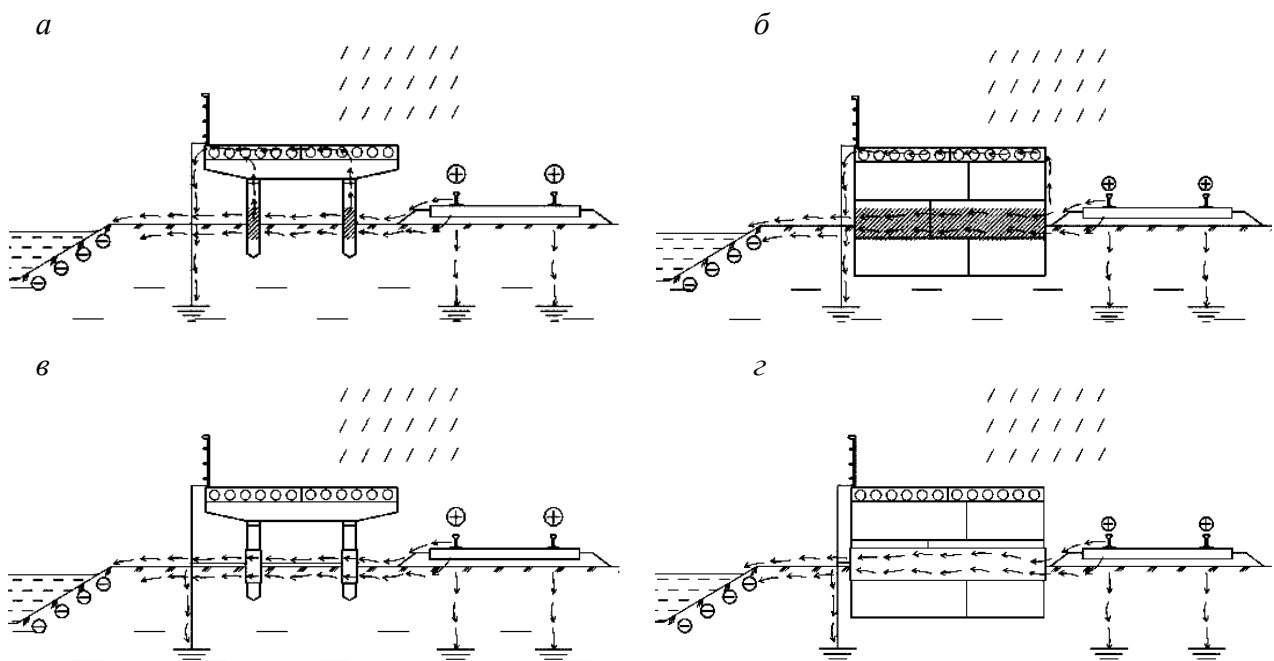


Рис. 2. Схеми протікання струмів витoku з рейкової колії на ділянках з позитивним потенціалом на рейках через конструкції високих пасажирських платформ: а, в – на залізобетонних стояках і ригелях; б, з – на опорах із бетонних блоків; а, б – без захисту; в, з – із заземленими екранами-покриттями

**Визначення мети та завдання дослідження.** Метою цього дослідження є встановлення залежності захисних властивостей заземлених екранів із електропровідних композицій на основі портландцементу й отвердженого кремніфтористим натрієм силікату натрію з наповнювачем — графітовим порошком від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном-покриттям. Для досягнення мети в роботі поставлені такі завдання дослідження: розробити методику експериментального дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій та оригінальну експериментальну установку — модель споруди, що зазнає впливу струмів витоку з рейкової колії на ділянках з позитивним потенціалом на рейках; виконати лабораторні дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій.

**Основна частина дослідження.** Досліджували екрани з електропровідних композицій з наповнювачем — графітовим порошком на основі портландцементу (проникної дії) та отвердженого кремніфтористим натрієм силікату натрію, склади яких прийняли за [12] і [13] відповідно.

Розроблено оригінальну методику експериментального дослідження, яка полягає у порівнянні величини електричного струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі споруди без захисного екрана  $I_{a60}$  і моделі споруди із захисним екраном  $I_{a61}$ . За показник ефективності екрана приймали величину зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі із захистом  $I_{a61}$  у порівнянні з моделлю без захисту  $I_{a60}$

$$\Delta I = (I_{a61} - I_{a60}) / I_{a60} \times 100 \% \quad (1)$$

Моделі споруди розробили на основі аналізу протікання через конструкції пасажирських платформ струмів витоку з рейкової колії на ділянках з позитивним потенціалом на рейках (рис. 2) без захисту (рис. 2, а, б) та із заземленими екранами-

покриттями (рис. 2, в, г). Як видно із рисунків, у дощову погоду струми витоку протікають крізь бетон, арматуру і заземлення платформи без захисту, а з екраном — крізь екран і заземлення, оминаючи бетон і арматуру (або мінімізуючись у них).

Дослідження здійснювали за допомогою оригінальної експериментальної установки (рис. 3).

Установка складається із моделі споруди-призми із важкого бетону з міцністю на стиск 20 МПа 1, у яку забетонований стержень із арматурної сталі з випуском уверх 2. Бетон моделі відповідає бетону споруди між її гранями (рис. 2, а) або бетону захисного шару між заземленою арматурою і гранню споруди (рис. 2, б). Цю модель-призму встановлювали у модель зволоженого ґрунту — дуже дрібний пісок 4, засипаний у металеву ємність 3. Струм, який натікає на споруду від джерел постійного струму, наприклад електрифікованої рейкової колії, створювали (моделювали) прикладанням різниці потенціалів 40 В між ємністю 3 та арматурним стержнем 2 у призмі 1, а його силу визначали за допомогою увімкнутих у ланцюг амперметрів (цифрових мультиметрів Sanwa PC510) 8 і 9.

Відсоток площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном-покриттям  $x$ , який змінювали під час дослідження, визначали як відношення площі контакту сталевго електрода з екраном-покриттям  $S_{e3}$  до площі всього екрана-покриття  $S_{ep}$

$$x = S_{e3} / S_{ep} \times 100 \% \quad (2)$$

Вимірювання починали за сухого стану ґрунту, потім його водонасичували та продовжували вимірювання протягом 240 год з періодичністю спочатку 1 год, потім 6, 12 і 24 год. Результати подавали у вигляді графіків залежності сили струму крізь бетон і арматуру  $I_{a6}$ , сили струму крізь захисний екран  $I_{ze}$  та величини зниження сили струму через бетон і арматуру моделі із захистом порівняно з моделлю без захисту  $\Delta I$  від часу  $t$ .



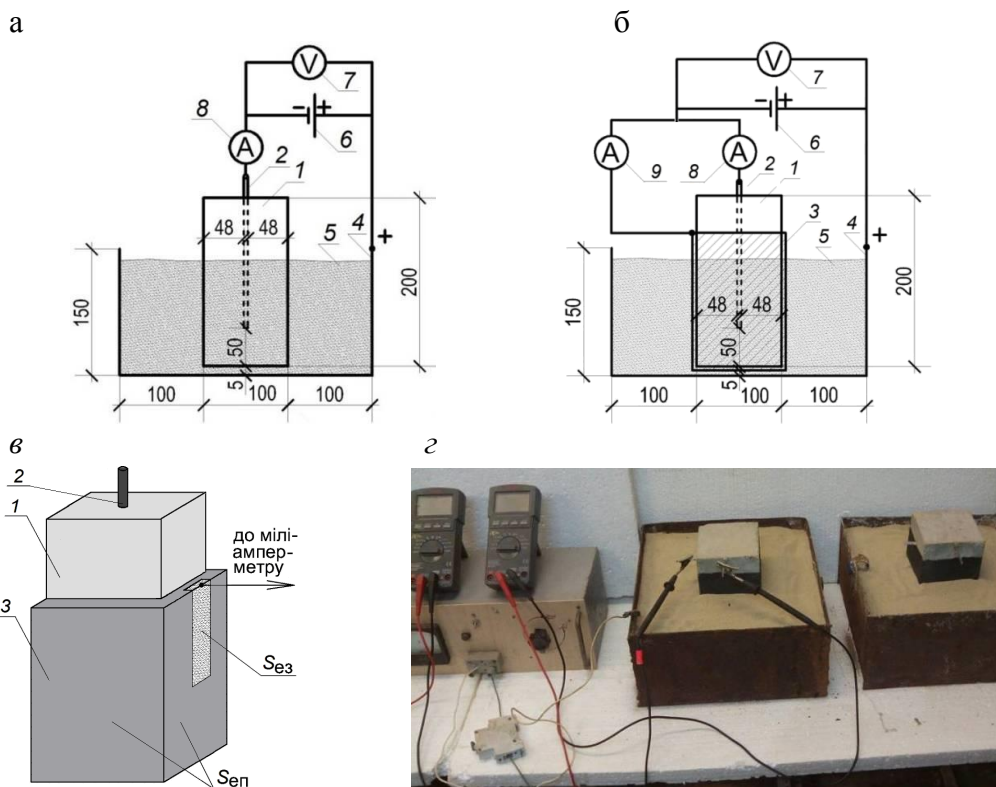


Рис. 3. Установа для експериментального дослідження ефективності екранів із електропровідних композицій для захисту споруд від електрокорозії:  
 а, б, в – схема установки з контрольним зразком (моделлю споруди) без екрана (а) і з досліджуваным зразком (моделлю споруди) з екраном із електропровідної композиції (б, в); з – вигляд експериментальної установки; 1 – бетон моделі; 2 – арматурний стержень моделі; 3 – захисний екран (покриття); 4 – металева ємність; 5 – зволожений пісок; б – джерело струму; 7 – вольтметр; 8 – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає крізь бетон і арматуру  $I_{аб}$ ; 9 – міліамперметр для вимірювання сили струму, що протікає крізь захисний екран і ґрунт  $I_{зе}$

**Результати дослідження та їх обговорення.** На рис. 4 і 5 наведено результати дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних композицій з наповнювачем – графітовим порошком на основі портландцементу (рис. 4) і отвердженого кремнійфтористим натрієм силікату натрію (рис. 5). Зокрема, залежності від часу з моменту водонасичення ґрунту  $t$  за різних відсотків площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном із електропровідної композиції  $x$  наведені: сили струму крізь арматуру і бетон моделі  $I_{аб}$  – на рис. 4, а, в і 5, а, в; сили струму крізь захисний екран  $I_{зе}$  – на рис. 4, б, г і 5, б, г; зміни сили струму крізь арматуру і

бетон моделі із захисними екранами у порівнянні з моделлю без захисту  $\Delta I_{аб}$  – на рис. 4, д і 5, д. На рис. 4, е і 5, е наведено залежності сили струму  $I_{аб}$  та  $I_{зе}$  від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном  $x$ .

Як бачимо із рис. 4, а-г і 5, а-г, у разі сухого стану ґрунту (на початку експерименту за  $t = 0$ ) сила струму  $I_{аб}$  і  $I_{зе}$  мінімальна як у моделі споруди без захисту, так і у моделях із захисними екранами. Після водонасичення ґрунту сила струму зростає втричі.

Як видно із рисунків, захист заземленим екраном забезпечує зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі

$I_{аб}$  (рис. 4, а, в, д і 5, а, в, д) за рахунок протікання частини струму  $I_{зе}$  крізь

захисний екран (рис. 4, б, г, д і 5, б, г, д).

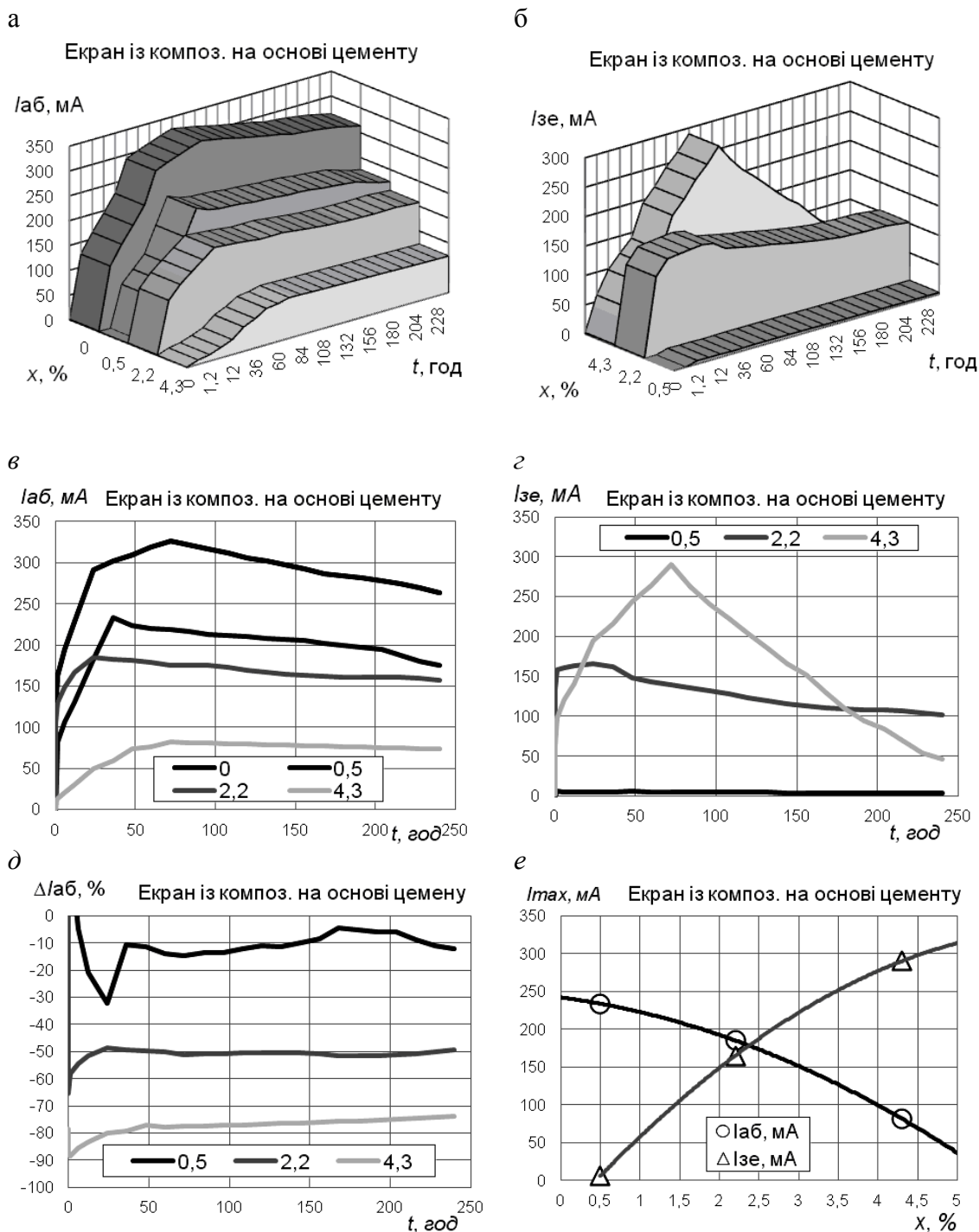


Рис. 4. Залежності показників ефективності заземлених екранів із електропровідної композиції на основі портландцементу за різних відсотків площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном  $x$  (0 – без захисного екрана; 0,5; 2,2; 4,3): а - д – залежності сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $I_{аб}$  (а, в), сили струму, що протікає крізь захисний екран  $I_{зе}$  (б, г), зміни сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $\Delta I_{аб}$  від часу з моменту водонасичення ґрунту  $t$ ; е – залежності  $I_{аб}$  та  $I_{зе}$  від відсотка площі контакту електрода заземлення з екраном  $x$

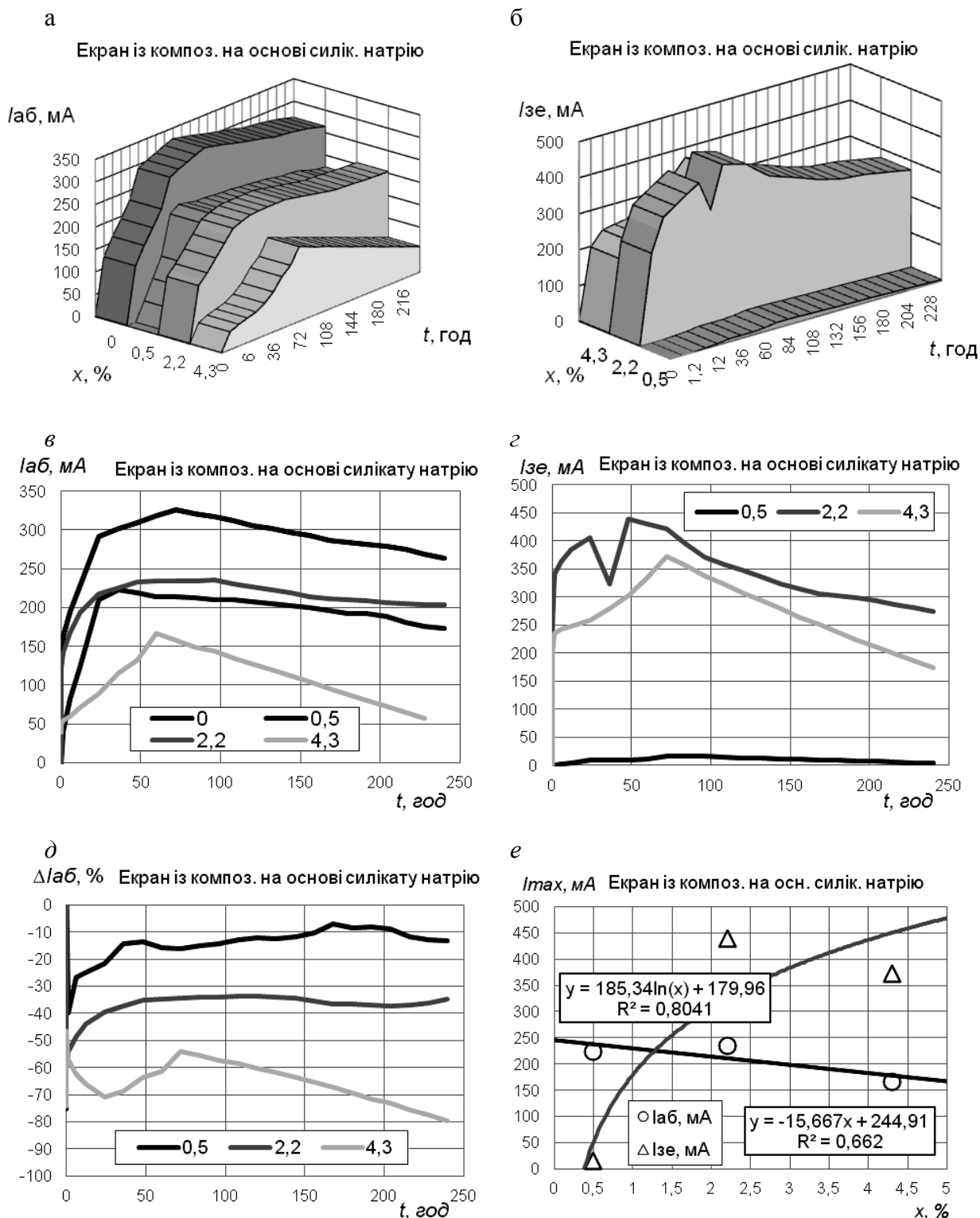


Рис. 5. Залежності показників ефективності заземлених екранів із електропровідної композиції на основі силікату натрію за різних відсотків площі контакту сталевго електрода заземлення з екраном  $x$  (0 – без захисного екрана; 0,5; 2,2; 4,3): а - д – залежності сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $I_{аб}$  (а, в), сили струму, що протікає крізь захисний екран  $I_{зе}$  (б, г), зміни сили струму, що протікає крізь арматуру і бетон моделі  $\Delta I_{аб}$  від часу з моменту водонасичення ґрунту  $t$ ; е – залежності  $I_{аб}$  та  $I_{зе}$  від відсотка площі контакту електрода заземлення з екраном  $x$

Захисні властивості екрана залежать від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з ним – зі збільшенням цього відсотка сила струму  $I_{аб}$  знижується, а  $I_{зе}$  зростає (рис. 4, е; 5, е). У разі застосування екрана із композиції на основі портландцементу з відсотком площі контакту електрода заземлення з ним  $x = 0,5\%$  сила струму  $I_{аб}$  знижується на  $\Delta R_{аб} = 10 - 15\%$ ,  $x = 2,2\%$  – на  $50 - 55\%$ ,  $x = 4,3\%$  – на  $75 - 80\%$ , У разі застосування екрана із композиції на основі силікату натрію з  $x = 0,5\%$   $I_{аб}$  знижується на  $\Delta R_{аб} = 10 - 15\%$ ,  $x = 2,2\%$  – на  $35 - 40\%$ ,  $x = 4,3\%$  – на  $65 - 70\%$ .

Це підтверджує ефективність заземлених екранів для захисту конструкцій, наприклад пасажирських платформ, від корозії струмами витоку.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Розроблено методику експериментального дослідження ефективності заземлених екранів із електропровідних силікатних композицій для захисту споруд від електрокорозії струмами витоку, що полягає у порівнянні величини електричного струму, який протікає крізь

арматуру і бетон моделі споруди без захисного екрана  $I_{аб0}$  та моделі споруди із захисним екраном  $I_{аб1}$ , і визначенні величини зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі із захистом  $I_{аб1}$  порівняно з моделлю без захисту  $I_{аб0}$ .

Установлено, що у разі сухого стану ґрунту сила струму як крізь бетон і арматуру мінімальна, як у моделі споруди без захисту, так і у моделях із захисними екранами. Після водонасичення ґрунту сила струму зростає втричі.

Захист заземленим екраном забезпечує зниження сили струму крізь бетон і арматуру моделі  $I_{аб}$  за рахунок протікання частини струму  $I_{зе}$  крізь захисний екран.

Захисні властивості екрана залежать від відсотка площі контакту сталевго електрода заземлення з ним – зі збільшенням цього відсотка сила струму  $I_{аб}$  знижується, а  $I_{зе}$  зростає. У разі застосування заземленого екрана з відсотком площі контакту електрода заземлення з ним до  $4,3\%$  сила струму крізь бетон і арматуру знижується для композиції на основі портландцементу на  $75-80\%$ , на основі силікату натрію – на  $65-70\%$ .

### Список використаних джерел

1. Корнфельд, И. А. Защита железобетонных конструкций от коррозии, вызываемой блуждающими токами [Текст] / И. А. Корнфельд, В. А. Притула. — М.: Стройиздат, 1964. — 73 с.
2. Старосельский, А. А. Электрокоррозия железобетона [Текст] / А. А. Старосельский. — К.: Будівельник, 1978. — 168 с.
3. Котельников, А. В. Блуждающие токи электрифицированного транспорта [Текст] / А. В. Котельников. — М.: Транспорт, 1986. — 278 с.
4. Подольский, В. И. Железобетонные опоры контактной сети. Конструкции, эксплуатация, диагностика [Текст] / В. И. Подольский. — М.: Интекст, 2007. — 152 с.
5. Liu Y.-C. Dynamic Analysis of the Leakage Current Corrosion for the Non-Grounded DC Railway Systems / Y.-C. Liu, E.-C. Chang, J.-L. Shyu, X.-G. Chen // International Journal of Electrical Energy, Vol. 3, No. 4, 2015. - P. 257-261.
6. Plugin A.N. Research of influence of leakage currents and stray currents on railways on buildings and constructions / A.N. Plugin, A.A. Plugin, O. Plugin, O. Dudin, O. Borzyak // 17 Internationale Baustofftagung (17Ibausil): Tagungsbericht. - Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2009. - Band 2. - P. 1151-1156.

7. Плугин, Ал. А. Исследование влияния величины напряжения пульсирующего однонаправленного постоянного электрического поля на электрокоррозию бетона [Текст] / Ал.А. Плугин // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. – Харків: УкрДАЗТ, 2010. – Вип. 115. – С. 56-67.

8. Електричні впливи на бетон (електрообробка та захист від електрокорозії бетонів, виробів і конструкцій із них) [Текст] / О. А. Плуґін, О. С. Борзяк, В. Б. Мартинова [та ін.]; за ред. А. А. Плуґіна і М. М. Зайченка. – Харків: Форт, 2013. – 300 с.

9. Воздействие токов утечки на конструкции пассажирских платформ, расположенных вблизи электрифицированных постоянным током участков пути [Текст] / О. С. Борзяк, Д. А. Плуґин, О. С. Герасименко [и др.] // Науковий вісник будівництва. – Харків: ХНУБА; ХОТВ АБУ, 2014. – № 1 (75). – С. 80-85.

10. Защита металлических и железобетонных сооружений железнодорожного транспорта от электрокоррозии с помощью диодного заземления [Текст] / Ал. А. Плуґин, О. С. Борзяк, А. А. Дудин [и др.] // Зб. наук. праць Укр. держ. акад. залізнич. трансп. — Харків: УкрДАЗТ, 2011. – Вип. 127. — С. 204-212.

11. Plugin D. Research into the effectiveness of grounded screens of electroconductive silicate compositions for electrocorrosion protection / D. Plugin, V. Kasyanov, V. Konev, S. Nesterenko, A. Afanasiev // Matec Web of Conferences 116, 01012 (2017). — DOI: 10.1051/mateconf/201711601012.

12. Композиція проникної дії для гідроізоляції та захисту від електрокорозії [Текст] : пат.113600 UA МПК 2016.01 С 04 В 28/00, С 04 В 41/65, С 04 В 111/90, С 04 В 111/20, С 04 В 111/72 / А.А. Плуґін, Т.О. Костюк, О.Ю. Прошин, О.А. Плуґін, Д.О. Бондаренко, В.В. Касьянов, О.С. Борзяк, В.В. Конєв; заявник та патентовласник Укр. держ. ун-т залізнич. тр-ту. - № а 2016 02005; заявл. 01.03.2016; опубл. 10.02.2017, Бюл. №3. – 6 с.

13. Електропровідна шпаклювальна композиція [Текст]: заявка на винахід № а2017 02778 / А.А. Плуґін, О.А. Плуґін, В.В. Касьянов, О.С. Борзяк, В.В. Конєв, Ю.Ю. Савчук, Т.О. Костюк, Д.О. Бондаренко; заявник УкрДУЗТ; заявл. 24.03.2017.

---

Плуґін Андрій Аркадійович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63.

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

Плуґін Олексій Андрійович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри будівельної механіки та гідравліки Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-70. E-mail: plugin0785@gmail.com.

Касьянов Володимир Володимирович, інженер кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63.

E-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com.

Конєв Віталій Васильович, інженер, ПАТ «Укрзалізниця». Тел.: +38 063 461-83-86. E-mail: ukrainoslav@ukr.net.

Плуґін Дмитро Артурович, д-р техн. наук, доцент, професор кафедри будівельних матеріалів конструкцій та споруд Українського державного університету залізничного транспорту. Тел. (057) 730-10-63.

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

Andrii A. Plugin, DSc, Professor, Head of Building Materials, Constructions and Buildings Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-63. E-mail: plugin\_aa@kart.edu.ua.

Oleksii A. Pluhin, PhD, Associated Professor, Associated Professor of Structural Mechanics and Hydraulics Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-70. E-mail: plugin0785@gmail.com.

Vladimir Kasyanov, engineer of Building Materials, Constructions and Buildings Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-63. E-mail: kasyanow.vladimir@gmail.com.

Vitalii Konev, engineer, Branch «Pivdenna zaliznytsia» (the railways of Southern) Public Joint Stock Company «Ukrainian Railway» («Ukrzaliznytsia»). Tel.: (063) 461-83-86. E-mail: ukrainoslav@ukr.net,

Dmytro A. Plugin, DSc, Associated Professor, Professor of Building Materials, Constructions and Buildings Department, Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057) 730-10-63. E-mail: plugin.da@gmail.com.

Стаття прийнята 14.08.2017 р.

УДК 624.012.35: 620.173 / 174

**ОСОБЛИВОСТІ РОЗРАХУНКУ КОСОЗАВАНТАЖЕНИХ ЕЛЕМЕНТІВ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ДІАГРАМ ЇХ СТАНУ «МОМЕНТ-КРИВИНА»**

Д-р техн. наук Є. М. Бабич, канд. техн. наук В. М. Ромашко (НУВГП)

**ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА КОСОЗАГРУЖЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С  
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДИАГРАММ ИХ СОСТОЯНИЯ «МОМЕНТ-КРИВИЗНА»**

Д-р техн. наук Е. М. Бабич, канд. техн. наук В. Н. Ромашко (НУВХП)

**CALCULATION FEATURES OF THE BIAXIAL BENT ELEMENTS USING THEIR  
STATE DIAGRAMS "MOMENT-CURVATURE"**

**Doct. of techn. Sciences E. Babich, Ph. D. in Engineering V. Romashko**

*Розглянуто особливості розрахунку косозавантажених залізобетонних елементів за деформаційно-силовою моделлю їх опору. Увагу зосереджено на розкритті внутрішньої статичної невизначеності перерізу зазначених елементів за допомогою додаткових рівнянь та гіпотез: аналітичної залежності діаграми стану «момент-кривина», функції граничних деформацій стиснутого бетону, гіпотези про зв'язок напружено-деформованого стану косозавантажених елементів з кутом нахилу нейтральної лінії.*

**Ключові слова:** косе завантаження, залізобетонні елементи, діаграма стану, методика розрахунку.

*Рассмотрены особенности расчета косозагруженных железобетонных элементов по деформационно-силовой модели их сопротивления. Внимание сосредоточено на раскрытии внутренней статической неопределенности сечения указанных элементов с помощью дополнительных уравнений и гипотез: аналитической зависимости диаграммы состояния «момент-кривизна», функции предельных деформаций сжатого бетона, гипотезы о связи напряженно-деформированного состояния косозагруженных элементов с углом наклона нейтральной линии.*

**Ключевые слова:** косое загрузеие, железобетонные элементы, диаграмма состояния, методика расчета.

*Calculation features of biaxial bending reinforced concrete elements by the deformation-force model of their resistance are considered. Attention is focused on the disclosure of the internal static uncertainty of the cross-section of these elements by means of additional equations and hypotheses: the analytic dependence of the "moment-curvature" state diagram, the functions of compressed concrete limiting deformations, the hypothesis about the connection of the stress-strain state of biaxial bending elements with the neutral line inclination angle. Three ways of determining its initial value are proposed: by the condition of materials elastic work; by the elliptic dependence hypothesis of the obliquely bent element stress-strain state parameters on the neutral line slope angle; according to the proportional dependence hypothesis of the biaxial bent element stress-strain state parameters on the neutral line slope angle.*

**Keywords:** biaxial bending, reinforced concrete elements, state diagrams, calculation procedure.

**Вступ.** У силовій моделі опору бетону та залізобетону особливості розрахунку позацентрово стиснутих залізобетонних елементів пов'язуються з розкриттям внутрішньої статичної невизначеності їх перерізу та врахуванням впливу прогинів на несучу здатність [1-3]. Для косостиснутих елементів зазначені особливості набувають ще більшої вагомості, оскільки через наперед невідомий кут нахилу нейтральної лінії  $\theta$  внутрішня статична невизначеність перерізу елемента зростає, а напрямок лінії прогинів залишається невідомим. Тому виконати розрахунок зазначених елементів без застосування ітераційних прийомів практично неможливо [4, 5].

У сучасних деформаційних моделях проблема розкриття внутрішньої статичної невизначеності поперечного перерізу косостиснутих елементів та врахування впливу прогинів на їх напружено-деформований стан теж залишається практично невирішеною. Підтвердженням цього є те, що розрахунки не тільки за несучою здатністю, але й за граничними станами другої групи, зокрема визначення прогинів (жорсткості) та ширини розкриття тріщин, здійснюються шляхом числених ітераційних операцій за допомогою спеціального програмного забезпечення [6-9]. Що ж до інженерних методів розрахунку косозавантажених елементів, то їх розроблення нашою хується на необхідність застосування низки емпіричних залежностей, параметрів та коефіцієнтів.

За розробленою деформаційно-силовою моделлю опору залізобетонних елементів [10, 11] можна не тільки суттєво зменшити обсяг ітераційних обчислень, але й мінімізувати проблему емпіризму в розрахунках косозігнутих та косостиснутих елементів. Адже саме використання узагальнених діаграм стану «момент-кривина», закладених в основу вищезгаданої моделі, сприяє відтворенню реального напружено-деформованого стану зазначених елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На жаль, у деформаційних моделях дуже мало уваги приділено деформуванню косозавантажених елементів. На сьогодні лише в окремих роботах розроблено пропозиції щодо розрахунку несучої здатності косозігнутих елементів [12], та й то лише за повного використання міцнісних властивостей арматури. Рекомендації ж чинних вітчизняних та закордонних норм [6, 13-15] є надто загальними, тому розрахунки косодеформованих елементів зазвичай перетворюються в числені та багаторівневі ітераційні процеси, здійснення яких без комп'ютерної техніки зі складним програмним забезпеченням стає практично неможливим.

Загальновідомо, що робота косозавантажених залізобетонних елементів характеризується підвищеною внутрішньою статичною невизначеністю, обумовленою неоднорідністю їх деформування не тільки вздовж висоти, але й уздовж ширини поперечного перерізу. Однак у деформаційних моделях прийомів чи способів розкриття зазначеної невизначеності на сьогодні так і не запропоновано. Повернення до реальної криволінійної епюри напружень стиснутого бетону могло б певною мірою сприяти вирішенню вищевказаної проблеми хоча б у розрахунках залізобетонних елементів за граничними станами першої групи. Але для цього необхідно знати граничні деформації стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu}$ , а для косозавантажених елементів – ще й з урахуванням форми їх стиснутої зони. На жаль, у жодній з деформаційних моделей так і не запропоновано аналітичні залежності з ефективного прогнозування вказаних деформацій. Також немає будь-яких рекомендацій чи способів ефективного прогнозування відносних деформацій розтягнутої арматури або крайніх фібр стиснутого бетону в нормальних перерізах косодеформованих залізобетонних елементів у методиках їх розрахунку за граничними станами другої групи.

**Мета та задачі досліджень.** Ця стаття спрямована на розроблення загальної методики розрахунку косодеформованих елементів на основі гіпотези, що поєднує силові фактори з деформаційними параметрами завантаженого залізобетонного елемента, забезпечуючи тим самим інтегральну оцінку напружено-деформованого стану його перерізу. В основу зазначеної методики закладаються моделі, гіпотези та передумови, що дають змогу відтворювати реальний напружено-деформований стан залізобетонних елементів з розкриттям їх внутрішньої статичної невизначеності при забезпеченні

методологічної єдності всіх розрахунків за граничними станами.

**Основна частина досліджень.** За деформаційно-силовою моделлю [10, 11, 16, 17] розрахунок косозавантажених елементів (рис. 1) виконується аналогічно до плоскозавантажених на основі загальноприйнятих положень механіки деформованого твердого тіла за системою таких співвідношень: статичних –  $M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$ ,  $N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$ , геометричних –  $1/r = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s)$  та фізичних –  $\sigma_c = f(\varepsilon_c)$ ,  $\sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct})$ ,  $\sigma_s = f(\varepsilon_s)$ .

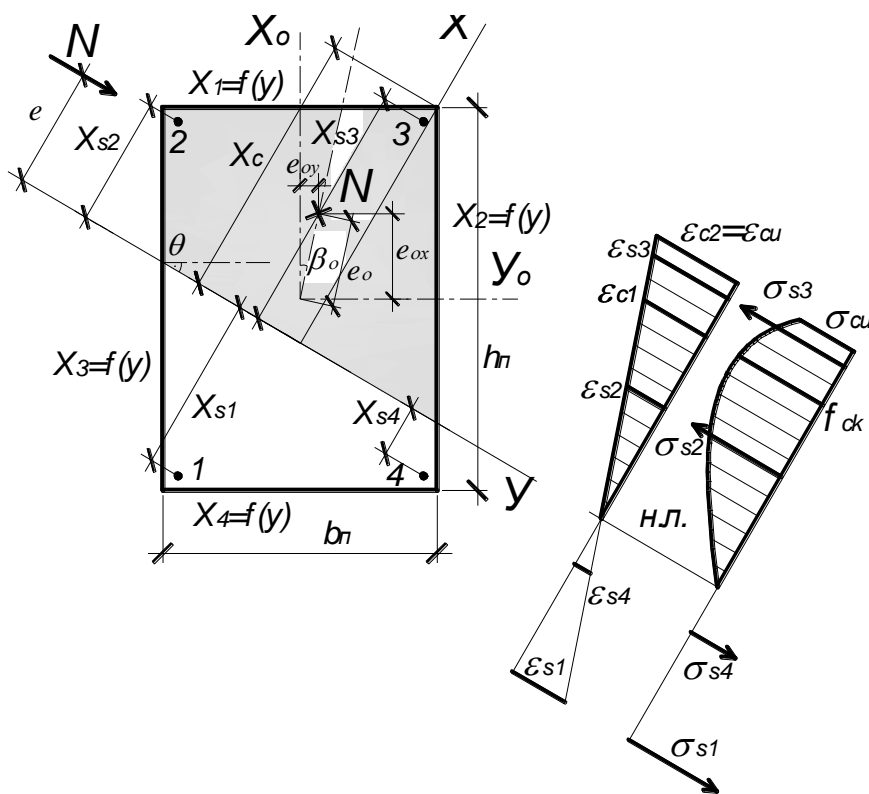


Рис. 1. До розрахунку костостиснутого залізобетонного елемента

Для максимального скорочення ітераційних обчислень вищезгадана система співвідношень доповнюється аналітичною залежністю узагальненої діаграми стану  $M = f(1/r)$ , функцією граничних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu} = f(\varepsilon_{si}, \rho_{li}, x_{si}, m_h, m_b)$ , отриманою з

цієї ж діаграми [10, 11, 17] за допомогою екстремального критерію несучої здатності  $dM/d(1/r) = 0$ , та однією із рекомендованих нижче гіпотез залежності основних параметрів напружено-деформованого стану косозавантажених елементів від кута нахилу нейтральної лінії  $\theta$ .



Визначальною в деформаційно-силовій моделі є узагальнена діаграма стану залізобетонного елемента (рис. 2), що описується залежністю

$$M = \frac{D_o \cdot 1/r - M_u \cdot ((1/r)/(1/r_u))^2}{1 + (D_o/M_u - 2/(1/r_u)) \cdot (1/r)}, \quad (1)$$

де  $D_o$  – початкове значення повної ( $\Sigma E_3 I_3$ ) або приведеної ( $E_{co} I_{red,o}$ ) жорсткості залізобетонного елемента;  $1/r_u$  – граничне значення кривини залізобетонного елемента при вичерпанні несучої здатності.

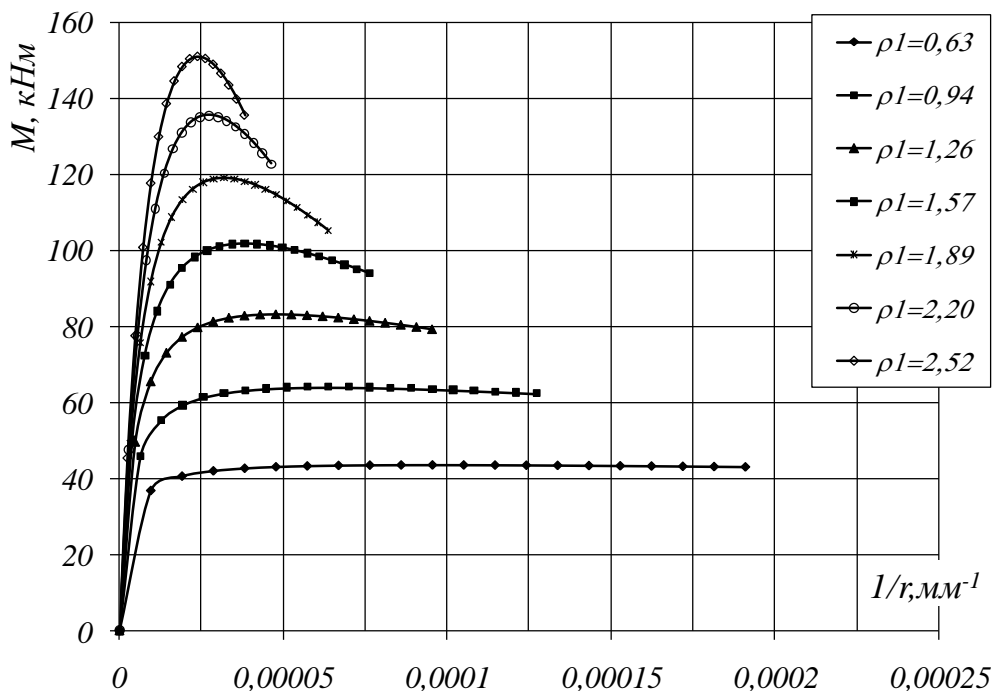


Рис. 2. Форми діаграм стану елемента  $M = f(1/r)$  залежно від його армування

Особливої уваги заслуговує кут нахилу нейтральної лінії  $\theta$ . Його рекомендується розраховувати за однією із трьох нижчеописаних методик.

1. Кут  $\theta$  не зв'язують з параметрами напружено-деформованого стану косозавантаженого елемента певними гіпотезами. Тоді його попереднє значення приймають за умовою пружної роботи матеріалів

$$\operatorname{tg} \theta \approx \frac{E_c \cdot I_{x,red} - s_x \cdot l_{ox}^2 \cdot N}{E_c \cdot I_{y,red} - s_y \cdot l_{oy}^2 \cdot N} \cdot \operatorname{tg} \beta_o, \quad (2)$$

де  $I_{x,red}, I_{y,red}$  – приведені моменти інерції перерізу елемента в напрямку осей  $X_o$  та  $Y_o$  відповідно;  $l_{ox}, l_{oy}$  – розрахункові довжини елемента у тих же напрямках;  $s_x, s_y$  – коефіцієнти, що залежать від схеми завантаження та закріплення елемента в напрямку тих же площин.

У подальшому його уточнюють разом з визначальними параметрами напружено-деформованого стану ( $\varepsilon_{c2}, \varepsilon_{s1}, \varepsilon_{ctv}, 1/r_u, f_u$  тощо) за двома загальноприйнятими рівняннями рівноваги до незаперечного виконання додаткових умов з обумовленою точністю  $\delta$ :

$$|(M_{u,i-1} - M_{u,i}) / M_{u,i-1}| \leq \delta; \quad (3)$$

$$|(f_{u,i-1} - f_{u,i}) / f_{u,i-1}| \leq \delta. \quad (4)$$

Діаграму стану залізобетонного елемента рекомендується подавати у вигляді  $1/r = f(M)$  за формулою

$$\frac{1}{r} = \frac{1/r_u}{2M_u} \left[ \left(1 - \frac{M}{M_u}\right) \frac{D_o}{r_u} + 2M - \sqrt{\left(\left(1 - \frac{M}{M_u}\right) \frac{D_o}{r_u} + 2M\right)^2 - 4M \cdot M_u} \right]. \quad (5)$$

2. Якщо вважати справедливою гіпотезу еліптичної залежності параметрів напружено-деформованого стану косозавантаженого елемента від кута нахилу

нейтральної лінії  $\theta$  (рис. 3), то згідно з [18] граничний згинальний момент і прогин необхідно обчислювати за виразами:

$$M_{u\theta} = \sqrt{I / \left( (\cos \theta / M_{ux})^2 + (\sin \theta / M_{uy})^2 \right)}; \quad (6)$$

$$f_{u\theta} = \sqrt{I / \left( (\cos \theta / f_{ux})^2 + (\sin \theta / f_{uy})^2 \right)}, \quad (7)$$

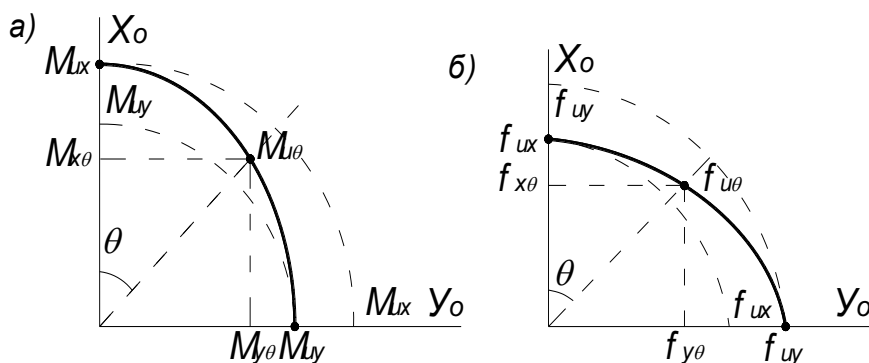


Рис. 3. Можливі випадки положення нейтральної лінії в косозавантажених залізобетонних елементах

з їх граничними значеннями в площинах  $X_o$  та  $Y_o$ , визначеними з окремих розрахунків косостиснутого елемента на позакентровий стиск

$$\begin{aligned} M_{ux} &= N_{ux} \cdot e_{ux}; \\ M_{uy} &= N_{uy} \cdot e_{uy}, \end{aligned} \quad (8)$$

де розрахункові ексцентриситети рівні відповідно

$$\begin{aligned} e_{ux} &= \frac{\varepsilon_{cu}}{1/r_{ux}} - \frac{h_n}{2} \cdot \cos \theta + f_{ux}; \\ e_{uy} &= \frac{\varepsilon_{cu}}{1/r_{uy}} - \frac{b_n}{2} \cdot \sin \theta + f_{uy}. \end{aligned} \quad (9)$$

При цьому кривини косозавантаженого елемента  $1/r_x$  та  $1/r_y$  в напрямках площин  $X_o$  і  $Y_o$  слід розраховувати за формулою (5) з урахуванням початкових

приведених жорсткостей перерізу залізобетонного елемента в зазначених площинах, відповідно  $D_{ox} = E_{co} I_{red,ox}$  та  $D_{oy} = E_{co} I_{red,oy}$ .

Кут нахилу нейтральної лінії  $\theta$  визначають за напрямком лінії прогинів

$$\operatorname{tg} \theta = (1/r_y)/(1/r_x). \quad (10)$$

3. Якщо покласти в основу гіпотезу пропорційної залежності параметрів напружено-деформованого стану косозавантаженого елемента від кута нахилу нейтральної лінії  $\theta$  (рис. 3), то граничні моменти і прогини з їх проекціями необхідно обчислювати за виразами:

$$M_{u\theta} = M_{ux} + (M_{uy} - M_{ux}) \cdot \sin \theta; \quad (11)$$

$$M_{x\theta} = M_{u\theta} \cdot \cos \theta; \quad M_{y\theta} = M_{u\theta} \cdot \sin \theta; \quad (12)$$

$$f_{u\theta} = f_{ux} + (f_{uy} - f_{ux}) \cdot \sin \theta; \quad (13)$$

$$f_{x\theta} = f_{u\theta} \cdot \cos \theta; \quad f_{y\theta} = f_{u\theta} \cdot \sin \theta. \quad (14)$$

Розрахунок залізобетонних елементів за граничними станами другої групи потребує оцінювання напружено-деформованого стану залізобетонних елементів не тільки на певній стадії, але й і в характерних перерізах, а саме: у перерізі з першою тріщиною, у перерізі, де може з'явитися наступна тріщина, та в деякому умовному осередненому перерізі блока між тріщинами. Тому попередні значення відносних деформацій крайових фібр стиснутого бетону

$$\varepsilon_{c2} = \varepsilon_{cu} \cdot M_u / M \cdot (1/r)/(1/r_u) \quad (15)$$

та відносних деформацій найбільш розтягнутого арматурного стержня

$$\varepsilon_{s1} = d \cdot (1/r) - \varepsilon_{c2} \quad (16)$$

у подальшому уточнюють разом з кривинами  $1/r_y$ ,  $1/r_x$  та кутом  $\theta$  за розв'язком системи загальноприйнятих статичних, геометричних та фізичних співвідношень до незаперечного виконання додаткових умов (3) та (4).

**Висновки з досліджень та перспективи подальшого розвитку у даному напрямку.** На підставі вищевикладеного розрахунок косозавантажених залізобетонних елементів у деформаційно-силовій моделі рекомендується виконувати шляхом розкриття внутрішньої статичної невизначеності їх нормальних перерізів через доповнення системи загальноприйнятих статичних, геометричних та фізичних співвідношень:

- функцією граничних відносних деформацій стиснутого бетону  $\varepsilon_{cu}$ ;
- універсальною аналітичною залежністю узагальненої діаграми стану  $M-1/r$ ;
- гіпотезою залежності основних параметрів напружено-деформованого стану косозавантажених елементів від кута нахилу нейтральної лінії  $\theta$ .

Загалом же розроблена методика розрахунку косодеформованих елементів може бути використана і для статично невизначених залізобетонних елементів та конструкцій.

#### Список використаних джерел

1. Пастернак, П. Л. Замечания к проекту новых норм проектирования железобетонных конструкций [Текст] / П. Л. Пастернак // Строительная промышленность. – 1944. – №7. – С. 20-23.
2. Гвоздев, А. А. Расчёт несущей способности конструкций по методу предельного равновесия: Сущность метода и его обоснование [Текст] / А. А. Гвоздев. – М.: Госстройиздат, 1949. – 280 с.

3. Мурашев, В. И. Трещиноустойчивость, жесткость и прочность железобетона [Текст] / В. И. Мурашев. – М.: Машстройиздат, 1950. – 268 с.
4. Расчет железобетонных конструкций при сложных деформациях [Текст] / М. С. Торяник [и др.]; под ред. М. С. Торяника. – М.: Стройиздат, 1974. – 295 с.
5. Руденко, Ю. М. Практический расчет жесткости железобетонных элементов прямоугольного сечения, работающих на косое внецентренное сжатие [Текст] / Ю. М. Руденко // Изв. вузов: Стр-во и арх-ра. – 1973. – №5. – С.23-28.
6. Eurocode-2: Design of Concrete Structures. Part 1-1: General Rules and Rules for - Building: EN 1992-1-1 [Final Draft, December, 2004], Brussels: CEN, 2004. – 226 p.
7. Бондаренко, В. М. Расчетные модели силового сопротивления железобетона [Текст] / В. М. Бондаренко, В. И. Колчунов. – СПб.; М.: АСВ, 2004. – 472 с.
8. Бабич, Є. М. Розрахунок згинальних залізобетонних елементів на тріщиностійкість на основі деформаційної моделі [Текст] / Є. М. Бабич, В. Є. Бабич, В. В. Савицький // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі і споруди: зб. наук. праць. – Рівне: НУВГП, 2005. – Вип. 12. – С. 85-90.
9. Бамбура, А. М. Експериментальні основи прикладної деформаційної теорії залізобетону [Текст]: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.01 / А. М. Бамбура. – К., 2005. – 379 с.
10. Ромашко, В. М. Деформаційно-силова модель опору бетону та залізобетону [Текст]: монографія / В. М. Ромашко. – Рівне: О. Зень, 2016. – 424 с.
11. Ромашко, В. М. Основи розрахунку залізобетонних елементів та конструкцій за деформаційно-силовою моделлю їх опору [Текст] / В. М. Ромашко // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2017. – Вип. 168. – С. 103-110.
12. Павліков, А. М. Нелінійна модель напружено-деформованого стану косозавантажених залізобетонних елементів у закритичній стадії: монографія [Текст] / А. М. Павліков. – Полтава: ПНТУ ім. Юрія Кондратюка, 2007. – 259 с.
13. СНБ 5.03.01-02. Конструкции бетонные и железобетонные [Текст] / Минстройархитектуры Республики Беларусь. – [Введ. 01.07.2003]. – Минск: Стройтехнорм, 2003. – 144 с.
14. ДБН В.2.6-98:2009. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції. Основні положення [Текст] / Мінрегіонбуд України. – [Чинні від 01.06.11]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 71 с.
15. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд. Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування [Текст] / Мінрегіонбуд України. – [Чинний від 01.06.11]. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 123 с.
16. Ромашко, В. Н. Обобщенная модель деформирования железобетонных элементов и конструкций [Текст] / В. Н. Ромашко // Международный научный журнал (International Scientific Journal), 2016. – № 3. – С. 84-86.
17. Romashko V. The construction peculiarities of the deformation and power model of concrete and reinforced concrete resistance / V. Romashko, O. Romashko // MATEC Web of Conf. 116, 02028, 1-8 (2017). (цитується в SCOPUS)
18. Ромашко, В. Н. Несущая способность гибких кососжимаемых керамзитожелезобетонных колонн при кратковременном и длительном действии нагрузки [Текст]: дисс. ... канд. техн. наук: 05.23.01 / Василий Николаевич Ромашко. – Ровно, 1987. – 198 с.

---

Бабич Євгеній Михайлович, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри промислового, цивільного будівництва та інженерних споруд Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (050) 142-25-04. E-mail: e.m.babich@nuwm.edu.ua.

Ромашко Василь Миколайович, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри основ архітектурного проектування, конструювання і графіки Національного університету водного господарства та природокористування (м. Рівне). Тел.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasy@gmail.com.

---

Babich Evgeniy, Doctor of Technical Sciences, professor, head of Department of Industrial, Civil Engineering and Engineering Structures National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne).

Tel.: (050) 142-25-04. E-mail: e.m.babich@nuwm.edu.ua.

Romashko Vasil, Ph. D. in Engineering, associate professor, head of Department of Architectural Designing Bases, Constructing and Graphics National University of Water Management and Nature Recourses Use (Rivne).

Tel.: (097) 595-75-91. E-mail: romashkovasyl@gmail.com.

Стаття прийнята 18.08.2017 р.

**УДК 624.046.5**

**СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНИЙ АНАЛІЗ НДС ВУЗЛА З'ЄДНАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ  
ВЕРХНЬОГО ПОЯСА СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЇ СТАЛЕЗАЛІЗОБЕТОННОЇ  
КОНСТРУКЦІЇ**

**Канд. техн. наук Г. М. Гасій (ПНТУ ім. Юрія Кондратюка)**

**КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫЙ АНАЛИЗ НДС УЗЛА СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ВЕРХНЕГО ПОЯСА СТРУКТУРНО-ВАНТОВОЙ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ  
КОНСТРУКЦИИ**

**Канд. техн. наук Г. М. Гасий (ПНТУ им. Юрия Кондратюка)**

**FINITE ELEMENT ANALYSIS OF THE STRESS AND STRAIN STATE OF THE NODE  
OF THE TOP BELT OF THE STEEL AND CONCRETE COMPOSITE CABLE SPACE  
FRAME**

**Cand. of techn. sciences G. M. Gasii**

*У статті наведено конструкцію та скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану вузла з'єднання складових елементів нової двопоясної просторової конструкції – структурно-вантового сталезалізобетонного покриття, по верхньому поясі. Була змодельована робота вузла з'єднання при різних граничних умовах. Установлено, що незалежно від способу прикладення навантаження та розподілу внутрішніх зусиль, вузол з'єднання забезпечує сумісну роботу елементів конструкції та є надійним в експлуатації.*

**Ключові слова:** сталезалізобетон, структура, ванта, деформація, напруження, модуль, вузол.

*В статье приведены конструкция и конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния узла соединения элементов новой двухпоясной пространственной конструкции – структурно-вантового сталезалезобетонного покрытия, по верхнему поясу. Была смоделирована работа узла соединения при разных способах приложения нагрузки и закрепления. Установлено, что независимо от способа приложения нагрузки и распределения внутренних усилий, узел соединения обеспечивает совместную работу элементов конструкции и есть надежным в эксплуатации.*

**Ключевые слова:** сталезалезобетон, структура, ванта, деформация, напряжение, модуль, узел.

The article presents a design and numerical research of a node connection of spatial modules of the steel and concrete composite cable space frame in top chord. As a result of the research, an effective and simple constructive solution of the node connection of the top belt elements of a new type of double-sided construction was created. The effectiveness of the node was established based on the results of the computer simulation the structure behavior under load for various boundary conditions by the finite element method, and based on the finite element analysis of the stress-strain state. The finite element analysis of the stress-strain state of the node connection for elements of the top belt of the steel and concrete composite cable space frame showed that its design does not have weak sections and places of concentration of considerable stresses. Modeling the behavior of the steel and concrete composite cable space frame under the action of the load showed reliable operation of the node connection. Thus, the node connection that was designed provides joint operation the constituent elements of the steel and concrete composite cable space frame, regardless of the way the external load is applied.

**Keywords:** composite steel and concrete, space structure, cable, stress, strain, module, node.

**Вступ.** Просторова структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція – новий тип будівельних конструкцій, що належить до покриттів. Будова такої конструкції дає змогу максимально ефективно використовувати фізико-механічні властивості матеріалів.

Трудомісткість та складність технології виготовлення, збирання та монтажу таких конструкцій є низькою [1]. Структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція є збірною та складається зі сталезалізобетонних модулів, які з'єднуються по верхньому та нижньому поясах (рис. 1).

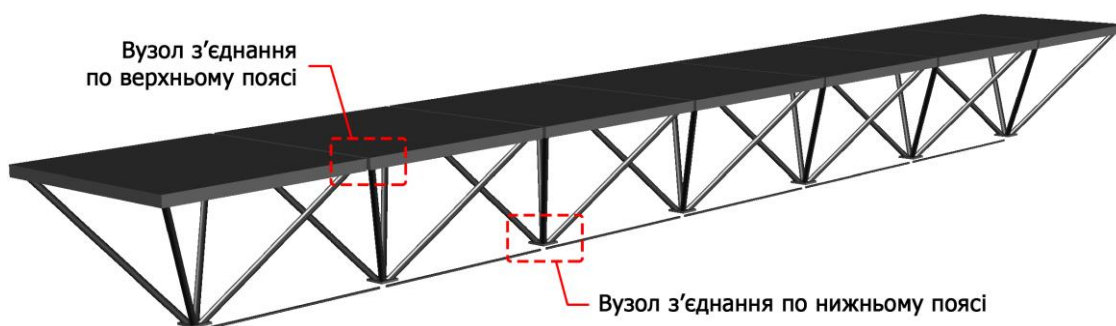


Рис. 1. Структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція

**Огляд останніх джерел і публікацій** показав, що застосування сталезалізобетонних модульних елементів у конструкціях покриття є доцільним [2], а ефективність рішення структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції та її складових елементів обґрунтована [3–6], також розроблено вузлові з'єднання елементів нижнього пояса та досліджено їх напружено-деформований стан [7–11].

З огляду на те, що структурно-вантова сталезалізобетонна конструкція може мати

різну кривизну та є комбінованою площинно-стрижневою системою, застосовувати вузлові системи звичайних структурних конструкцій неможливо, оскільки вони призначені для з'єднання лише стрижневих елементів [12–14]. У зв'язку з цим виникає необхідність у розробленні та дослідженні вузлових з'єднань, зокрема по верхньому поясі. Нині для проектування та визначення напруженого стану конструкцій часто застосовують комп'ютерне моделювання [15].

**Визначення мети та задачі дослідження.** Створити вузлове з'єднання для нових структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій та дослідити його роботу. Відповідно до поставленої мети було сформульовано такі задачі дослідження:

– розробити вузол з'єднання елементів верхнього пояса структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції;

– установити ефективність конструкції вузла з'єднання шляхом дослідження його напружено-деформованого стану. Напружено-деформований стан вузла

з'єднання дослідити за допомогою сучасних підходів, зокрема застосуванням комп'ютерного моделювання умов роботи та прогнозування поведінки. Для моделювання роботи вузла з'єднання застосувати метод скінченних елементів.

**Основний матеріал і результати.** Розроблений вузол з'єднання модульних елементів структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції по верхньому поясі складається зі сталевих деталей, до яких приварені стрижні решітки. Вузлові деталі об'єднані із залізобетонною плитою в процесі її бетонування (рис. 2).

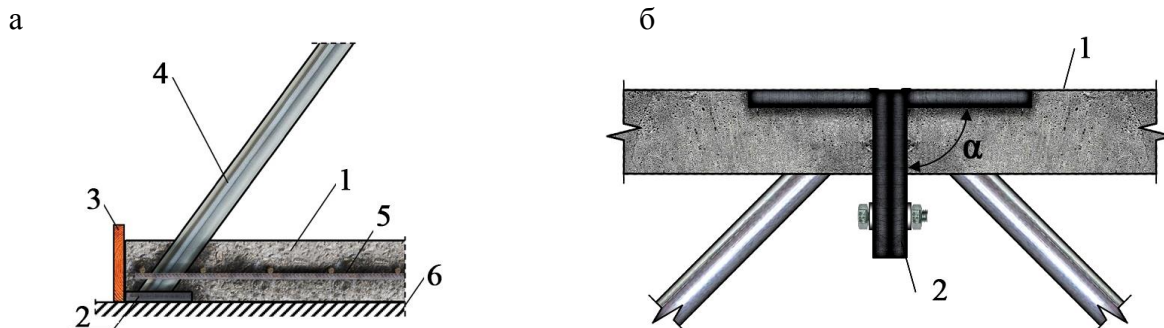


Рис. 2. Вузол з'єднання по верхньому поясі:

1 – залізобетонна плита (верхній пояс); 2 – вузол з'єднання; 3 – опалубка; 4 – стрижень; 5 – армування; 6 – рівна поверхня

Залежно від кривизни покриття кут  $\alpha$  може мати різне значення. Така конструкція вузла була застосована для з'єднання модульних елементів при виготовленні експериментального зразка структурно-вантової сталезалізобетонної вигнутої плити прольотом 5,6 м (рис. 3). У цьому випадку кут  $\alpha=5^\circ$  дав змогу отримати конструкцію із висотою підйому 0,8 м. Вузол та його складові були розраховані з урахуванням вимог чинних національних норм щодо проектування сталевих та залізобетонних конструкцій.

При побудові комп'ютерної моделі вузла з'єднання та накладенні на неї граничних умов було враховано спільну роботу просторових модулів із елементами нижнього пояса. При моделюванні

вважалося, що вузол по нижньому поясі та його елементи були достатньо міцними. Моделювання фізико-механічних характеристик матеріалів виконувалося шляхом задавання модуля пружності та коефіцієнта Пуассона, які були визначені експериментально [16].

Армування плити моделювалося шляхом задавання приведених характеристик [16]. Як приклад було виконано аналіз напружено-деформованого стану вузла з'єднання балкової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції, яка складалася із просторових модулів з розмірами на плані 0,8×0,8 м та висотою 0,5 м. Скінченно-елементна модель була побудована з урахуванням рекомендацій (рис. 4) [17].

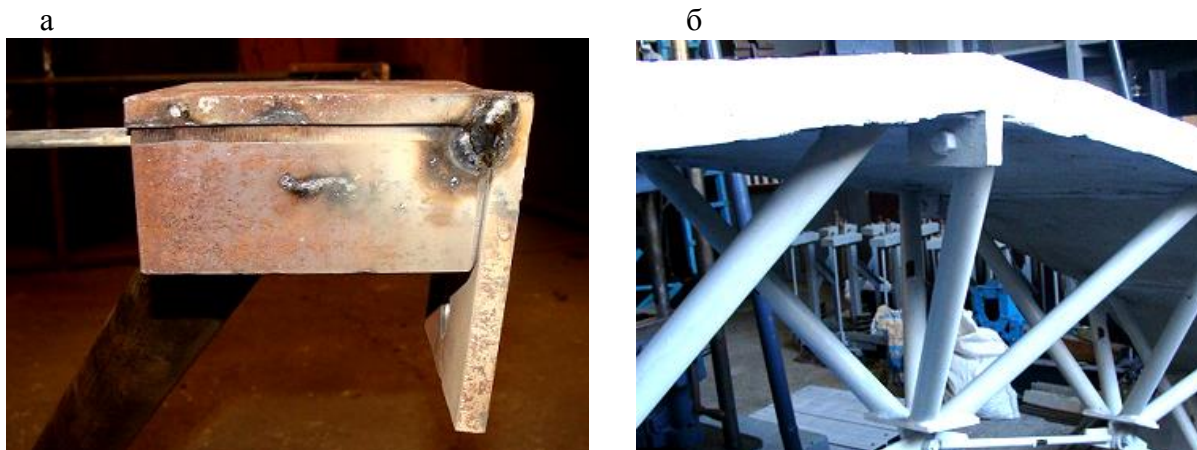


Рис. 3. Вузол у процесі виготовлення (а) та у готовому стані (б)

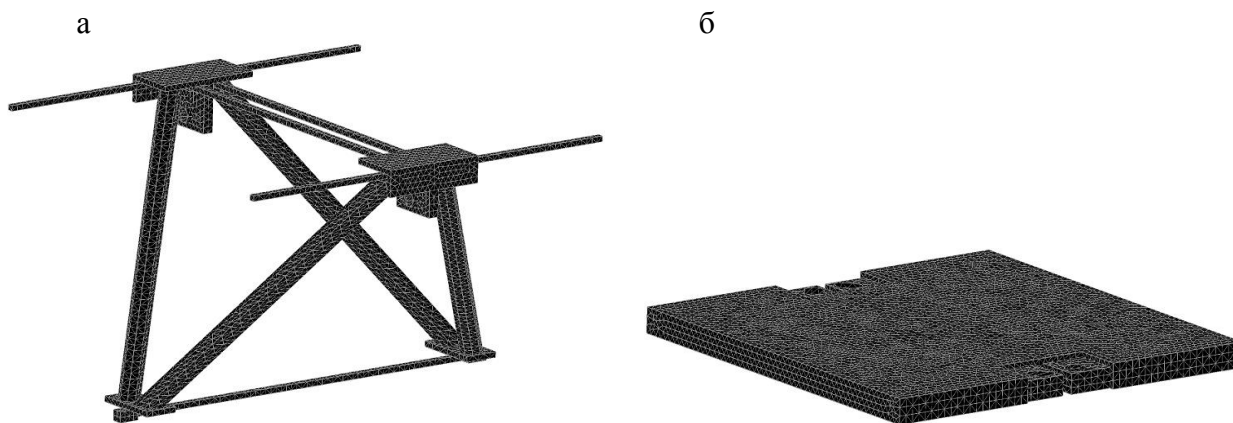


Рис. 4. Скінченно-елементна модель сталеві частини конструкції (а) та залізобетонної плити (б)

Між сталевію решіткою і залізобетонною плитію моделювалася поверхня контакту (рис. 5). Поверхня контакту також задавалася для болтового вузла з'єднання по верхньому поясі та для елементів нижнього пояса таким чином, щоб змоделювати шарнір у вузлах з'єднання.

Зважаючи на те, що пошук рішення для всієї конструкції потребує значних затрат часу, а сама модель включає велику кількість складних деталей та контактних поверхонь, що може бути причиною отримання суттєвих помилок у розрахунку, скінченно-елементний аналіз вузла з'єднання було виконано на фрагменті конструкції. При скінченно-елементному

аналізі вузла з'єднання головний акцент робився на дослідженні напружено-деформованого стану в стадії експлуатації, тому навантаження та фізико-механічні властивості матеріалів було задано відповідно до цієї стадії. З метою отримання об'єктивних даних модель була розрахована за шістьма схемами, кожна з яких передбачала інші граничні умови.

За першою, другою і третьою схемами дослідження модель конструкції мала з обох боків шарнірне закріплення. За четвертою, п'ятою і шостою схемами дослідження модель конструкції мала з одного боку шарнірне закріплення, а з другого – вільно опертий край.



Закріплення нижнього пояса при всіх схемах дослідження було таким, що дозволяло горизонтальне переміщення у поздовжньому напрямку. Навантаження приймалося рівномірно розподіленим і прикладалося до різних частин конструкції залежно від схеми дослідження. При першій і четвертій схемах дослідження

навантаження прикладалося до всієї поверхні верхнього пояса, при другій і п'ятій – до сталеві частини (у вузлах з'єднання), при третій та шостій – лише до залізобетонної плити.

Результати пошуку рішення відображені у вигляді ізополів напружень Мізеса (рис. 6-8).

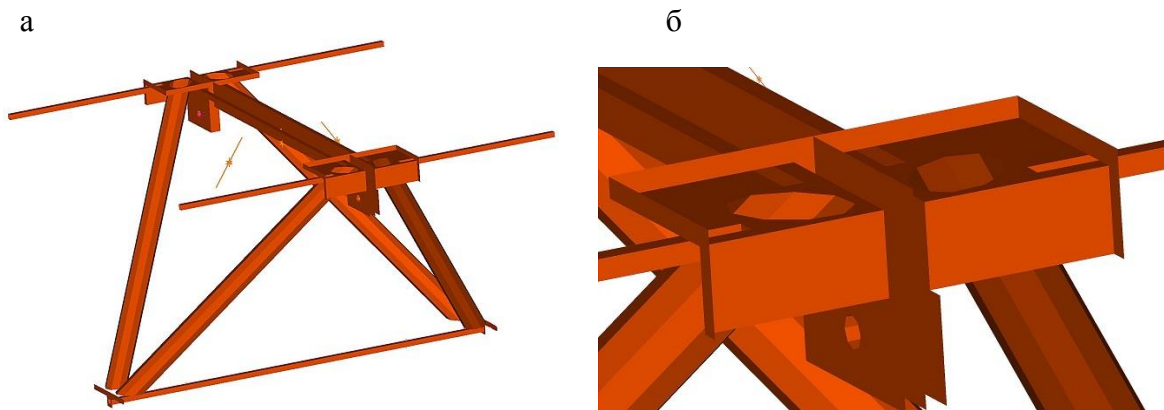


Рис. 5. Контактні поверхні: а – загальний вигляд; б – у вузлі з'єднання

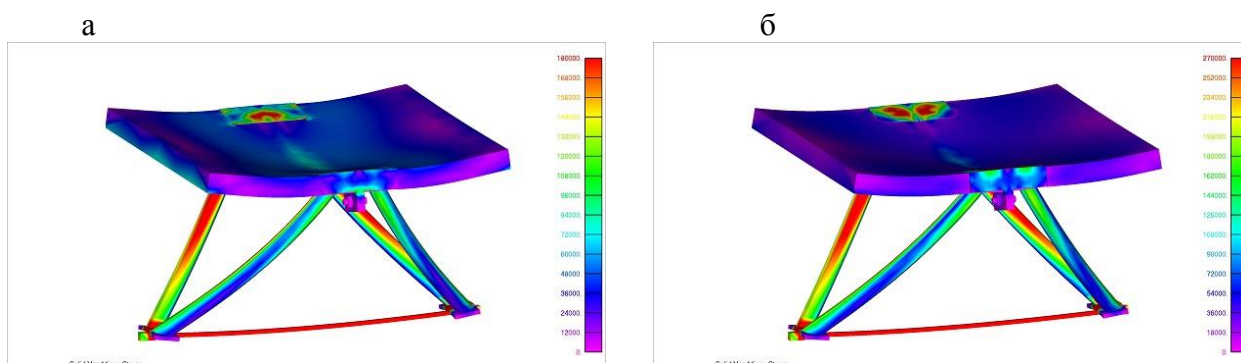


Рис. 6. Результати моделювання за першою (а) і четвертою (б) схемами

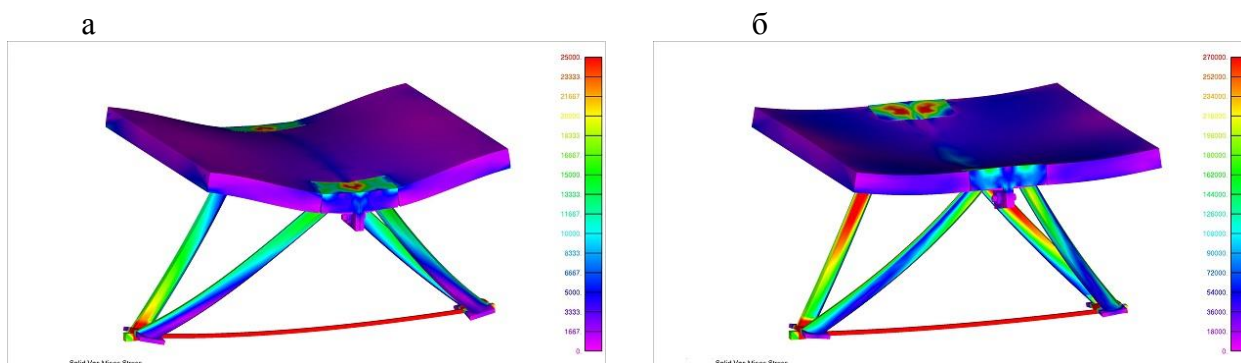


Рис. 7. Результати моделювання за другою (а) і п'ятою (б) схемами

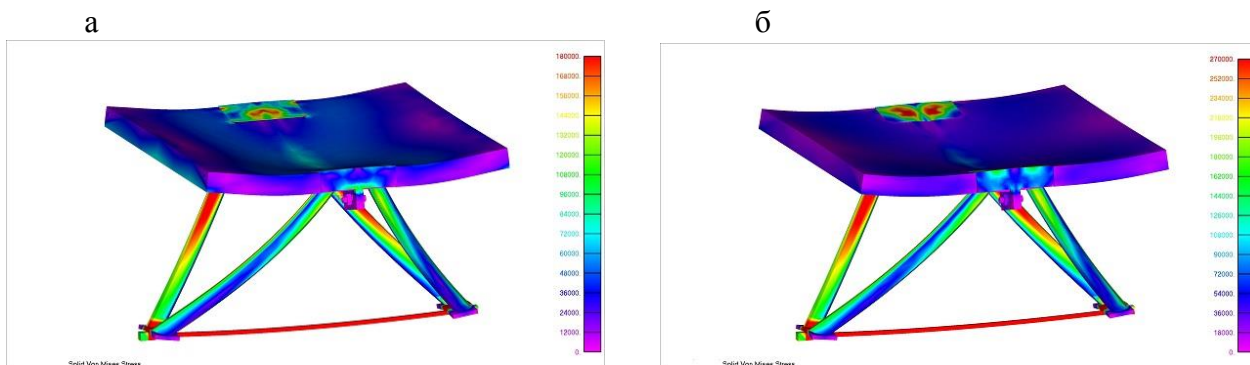


Рис. 8. Результати моделювання за третьою (а) і шостою (б) схемами

Моделі, які мали з обох боків шарнірне закріплення, зазнали менших деформацій, ніж у інших випадках при тому самому завантаженні. Також слід зазначити, що деформації сусідніх вузлових деталей, з'єднаних болтом, були сумісними незалежно від схеми дослідження. До того

ж у місці улаштування болта так само, як і в самому болті виникли найменші напруження (рис. 9), що може свідчити про те, що руйнування такого вузла не відбудеться через зрізання чи зминання болта.

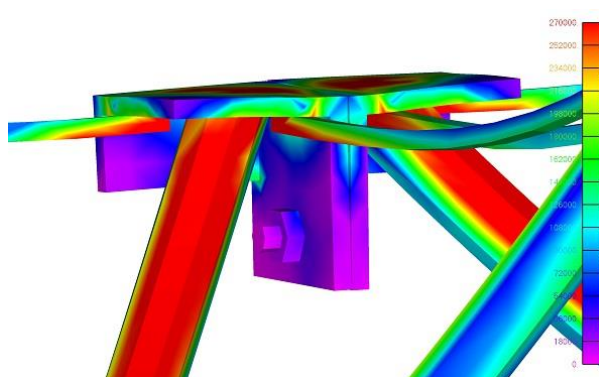


Рис. 9. Напружено-деформований стан вузла з'єднання

Загалом вузол з'єднання забезпечує надійну та сумісну роботу складових елементів конструкції незалежно від способу прикладання зовнішнього навантаження. При прикладенні експлуатаційних навантажень вузол з'єднання не зазнає суттєвих деформацій, які можуть призвести до руйнування. Підтвердженням цього є результати експериментальних досліджень структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції на дію тимчасового навантаження, прикладеного у вузлах з'єднання.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** У результаті проведеного дослідження було створено ефективне та просте у виготовленні конструктивне рішення вузлового з'єднання елементів верхнього пояса двопоясної конструкції нового типу – просторового структурно-вантового сталезалізобетонного покриття. Висновок про ефективність розробленого вузлового з'єднання був зроблений на підставі результатів уперше проведеного автором комп'ютерного моделювання умов роботи

конструкції під навантаженням при різних граничних умовах за допомогою методу скінченних елементів, а також на підставі скінченно-елементного аналізу його напружено-деформованого стану. Скінченно-елементний аналіз напружено-деформованого стану розробленого вузла з'єднання елементів верхнього пояса нової структурно-вантової сталезалізобетонної конструкції показав, що його будова не має

слабких ділянок та місць концентрацій значних напружень. Моделювання роботи конструкції під дією навантаження показало надійну роботу вузла з'єднання. Таким чином, розроблений вузол з'єднання забезпечує сумісну роботу складових елементів конструкції незалежно від способу прикладання зовнішнього навантаження.

### *Список використаних джерел*

1. Gasii, G. M. Comparative characteristics of the spatial grid-cable steel-concrete composite slab [Text] / G. M. Gasii / Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Теорія і практика будівництва. – 2016. – № 844. – С. 260–265.
2. Wong H.T. Behaviour and modelling of steel-concrete composite shell roofs: PhD Thesis / Hon-Ting Wong. – Hong Kong: PolyU, 2005. – 420 p.
3. Gasii G.M. Types of steel and concrete composite cable space frames / G.M. Gasii / Science and Transport Progress. Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport. – 2016. – №6 (66). – P. 158 – 165.
4. Storozhenko L.I. Analysis of stress-strain state of the steel-concrete composite ribbed slab as a part of the spatial grid-cable suspended structure / L.I. Storozhenko, G.M. Gasii // Academic journal. Industrial Machine Building, Civil Engineering. – 2016. – №2. – P. 81–86.
5. Gasii G.M. The flat double-layer grid-cable steel-concrete composite / G.M. Gasii // Proceedings of the METNET Seminar 2016 in Castellon. – Hämeenlinna: HAMK University of Applied Sciences. – 2016. – P. 56–62.
6. Стороженко, Л. І. Великопролітні структурно-вантові сталезалізобетонні покриття для будівель і споруд аеропортів [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Проблеми розвитку міського середовища. – 2016. – №2. – С. 72–79.
7. Гасій, Г. М. Основи формотворення і проектування просторових покриттів із структурно-вантових сталезалізобетонних конструкцій [Текст] / Г. М. Гасій // Строительство, материаловедение, машиностроение: сб. науч. трудов. – 2016. – №87. – С. 48–53.
8. Стороженко, Л. І. Дослідження напруженого стану елементів вузлових з'єднань структурно-вантових сталезалізобетонних покриттів на основі результатів моделювання умов їх роботи [Текст] / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій // Містобудування та територіальне планування. – 2016. – № 61. – С. 343–347.
9. Гасій, Г. М. Аналіз напружено-деформованого стану трапецієподібної сталеві пластины вузла з'єднання елементів нижнього пояса експериментальної структурно-вантової сталезалізобетонної циліндричної оболонки [Текст] / Г. М. Гасій // Зб. наук. праць Укр. держ. ун-ту залізнич. трансп. – Харків: УкрДУЗТ, 2016. – Вип. 162. – С.41–47.
10. Гасій, Г. М. Напружено-деформований стан сталеві пластины прямокутної форми вузла з'єднання стрижневих елементів структурно-вантової сталезалізобетонної циліндричної оболонки [Текст] / Г. М. Гасій // Вісник ОДАБА. – 2016. – Вип. 62. – С. 215–219.
11. Гасій, Г. М. Проектування опорного вузла структурно-вантової сталезалізобетонної вигнутої плити [Текст] / Г. М. Гасій // Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди. – 2016. – Вип. 32. – С. 129–136.

12. Bai Y. Novel Joint for Assembly of All-Composite Space Truss Structures: Conceptual Design and Preliminary Study / Y. Bai, X. Yang // Journal of Composites for Construction. – 2012. – Vol. 17. – № 1. – P. 130–138.
13. Chilton J. Space grid structures / John. Chilton. – Boston: Architectural Press, 2000. – 180 p.
14. Lan T. T. Space Frame Structures / T. T. Lan. – Boca Raton: CRC Press LLC, 1999. – 129 p.
15. Zona A. Finite element models for nonlinear analysis of steel–concrete composite beams with partial interaction in combined bending and shear / A. Zona, G. Ranzi // Finite Elements in Analysis and Design. – Elsevier, 2011. – Vol. 47. – № 2. – P. 98–118.
16. Стороженко, Л. І. Просторові сталезалізобетонні структурно-вантові покриття [Текст]: монографія / Л. І. Стороженко, Г. М. Гасій, С. А. Гапченко. – Полтава: ТОВ «АСМІ», 2015. – 218 с.
17. Перельмутер, А. В. Беседы о строительной механике [Текст]: научное издание / А. В. Перельмутер. – М.: Издательство SCAD Soft, АСВ, 2014. – 250 с.

---

Гасій Григорій Михайлович, канд. техн. наук, доцент, докторант кафедри конструкцій із металу, дерева і пластмас Полтавського національного технічного університету імені Юрія Кондратюка.  
E-mail: grigorii\_g\_m@ukr.net.

Gasii Grygorii Mykhailovych, cand. of techn. sciences, associate professor, doctoral student of the department of structures from a metal, wood and plastics, Civil Engineering faculty, Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University. E-mail: grigorii\_g\_m@ukr.net/

Стаття прийнята 25.08.2017 р.

**УДК 629.4.027**

## **МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ ВІРТУАЛЬНИХ ВИРОБНИЦТВ З РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВІВ**

**Канд. техн. наук Ю. М. Дацун**

## **МЕТОДЫ ФОРМИРОВАНИЯ ВИРТУАЛЬНЫХ ПРОИЗВОДСТВ ПО РЕМОНТУ ЛОКОМОТИВОВ**

**Канд. техн. наук Ю. Н. Дацун**

## **METHODS OF FORMING VIRTUAL PRODUCTION FOR REPAIRING LOCOMOTIVES**

**Cand. of techn. sciences Y. Datsun**

*У статті визначено, що основним критерієм при формуванні віртуальних виробництв з ремонту локомотивів повинно бути отримання синергетичного ефекту. Для цього запропоновано формування віртуальних виробництв за принципом доповнення компетенцій складових ремонтного виробництва з урахуванням визначених коефіцієнтів відповідності виробництв. Наявність вагових коефіцієнтів частинних критеріїв відповідності виробництв дає змогу розв'язувати задачу багатокритеріальної оптимізації методами, які використовують процедури ранжирования критеріїв і порівняння альтернатив. Порівняння*

результатів розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації показало, що найбільшою адекватністю в таких умовах характеризуються методи адитивної та мультиплікативної згорток.

**Ключові слова:** локомотив, ремонт, виробництво, віртуальне підприємство, синергетичний ефект.

*В статье определено, что основным критерием при формировании виртуальных производств по ремонту локомотивов должно быть получение синергетического эффекта. Для этого предложено формирование виртуальных производств по принципу дополнения компетенций составляющих ремонтного производства с учетом определенных ранее коэффициентов соответствия производств. Наличие весовых коэффициентов частных критериев соответствия производств позволяет решать задачу многокритериальной оптимизации методами, использующими процедуры ранжирования критериев и сравнения альтернатив. Сравнение результатов решения задачи многокритериальной оптимизации показало, что наибольшей адекватностью в таких условиях характеризуются методы аддитивной и мультипликативной сверток.*

**Ключевые слова:** локомотив, ремонт, производство, виртуальное предприятие, синергетический эффект.

*In the paper the need to transform of repair production of locomotives of railways in modern conditions is formulated. To expand the technological capabilities of repair productions it is proposed to use new organizational and production forms - virtual enterprises. It was determined that the main criterion for the formation of virtual enterprises for the repair of locomotives should be obtainment a synergistic effect. For this purpose, it is proposed the formation of virtual enterprises by the principle of supplementing the competences of the components of repair production with the account of the previously determined coefficients of conformity of production. Coefficients of conformity of repair production are complex indicators which are calculated by four components of repair production: the equipment and the tool, the personnel, the working environment, the documentation. The presence of weight coefficients of particular criteria the conformity of productions allows to solve the problem of multicriteria optimization by methods that use procedures of ranking criteria and comparing alternatives. The objective function is represented as the minimization of criteria. A comparison of the results of the solution of the optimization problem of multicriteria optimization showed that the methods of additive and multiplicative convolutions are characterized by the greatest adequacy in such conditions.*

**Key words:** locomotive, production, repair, synergetic effect, virtual enterprise.

**Вступ.** Однією з найгостріших проблем залізниці України є фізичне та моральне старіння основних фондів, що спричиняє зниження показників безпеки руху на залізниці, збільшення собівартості перевезень.

Локомотиворемонтні підприємства галузі працюють в умовах зменшення програми ремонту та постійного браку коштів. Для збільшення прибутковості та конкурентоспроможності ремонтні підприємства змушені розширювати номенклатуру ремонту типів

рухомого складу за рахунок інших серій магістрального і промислового залізничного транспорту. При цьому ремонтні підприємства не завжди мають таку можливість, з огляду на високий рівень витрат на переналадження виробничого процесу, складну й інерційну структуру управління. Якісні зміни в такій ситуації можливі за рахунок кооперації підприємств, колективів та окремих людей задля вирішення поставлених завдань. Розвиток інформаційних та мережевих

технологій викликав появу нових організаційно-виробничих форм – віртуальних підприємств, що характеризуються динамічною, гнучкою та адаптивною структурою. Для впровадження концепції віртуальних підприємств з ремонту локомотивів, крім вирішення правових та фінансових питань, потребує визначення процес пошуку можливих виконавців і ресурсів, що оптимально відповідають поставленим завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Концепція віртуальних підприємств з'явилась на початку 90-х років ХХ ст. [1, 2] як найбільш передова та ефективна форма організації підприємства з точки зору наявних технічних і економічних умов. Тобто віртуальне підприємство означає мережеву, комп'ютерно-інтегровану організаційну структуру, що об'єднує неоднорідні ресурси, розташовані в різних місцях. Нерідко акцент робиться на тимчасовий характер об'єднання ресурсів у віртуальній організації: тоді вона розуміється як міжорганізаційне гнучке підприємство, що створюється на обмежений період, головна мета якого — отримання вигоди завдяки розширенню асортименту товарів і послуг [3-5]. На основі результатів аналізу зарубіжних та вітчизняних праць у [6] пропонується удосконалити систему технічної експлуатації тягового рухомого складу за рахунок створення віртуальної системи управління технічною експлуатацією рухомого складу, як нового, так і модернізованого та існуючого з урахуванням його стану, виду, ремонтного рівня депо та системи його ремонту в комплексі. У запропонованому підході під час формування ремонтної складової враховуються ремонтні виробництва локомотивних депо, що значно звужує можливості віртуального підприємства. Визначення оптимального розміщення по базах ремонту проводиться на рівні одиниць рухомого складу (тепловозів), з урахуванням кількості стійл та часу

очікування в черзі. На сьогодні зниження обсягів роботи, чисельності експлуатованого парку локомотивів та програми їх ремонту не призводить до появи черг локомотивів в очікуванні обслуговування чи ремонту. Нинішні реалії вимагають від підприємств можливості виконувати ремонт значно більшої номенклатури рухомого складу різних років виготовлення, видів руху і навіть різних форм власності. Ремонт окремих вузлів та агрегатів локомотивів останнім часом може проводитися навіть невеликими спеціалізованими підприємствами. У таких умовах неабиякої актуальності набувають методи формування віртуальних підприємств із визначенням оптимальної структури для повузлового ремонту локомотивів за рядом певних критеріїв.

**Визначення мети та завдання дослідження.** Визначення та оцінка методів формування віртуального підприємства з ремонту локомотивів.

Для цього необхідно провести аналіз основних статей витрат при ремонті локомотивів, визначити основний критерій та сформулювати оптимізаційну задачу формування віртуальних виробництв з ремонту локомотивів. Порівняти методи вирішення задачі оптимізації та визначити методи, що характеризуються найбільшою адекватністю.

**Основна частина дослідження.** Аналіз основних статей витрат під час ремонту локомотивів [7] показав, що 50 % від усіх витрат припадає на комплектуючі вироби й послуги підрядних організацій. На сировину і матеріали витрачається 11 %. Внутрішньовиробничі витрати становлять менше ніж 40 % від загальної калькуляції. Це свідчить про те, що резерви скорочення витрат при ремонті локомотивів усередині підприємства практично вичерпані. Масштаб витрат на ремонт вузлів і виробництво комплектуючих на інших підприємствах доводить доцільність застосування віртуальних принципів організації ремонтних виробництв.

Основними системними якостями віртуальних підприємств є нелінійність розвитку, стійкість зв'язків, цілісність і структурність. Нелінійність віртуальних підприємств обумовлена виникненням синергетичного ефекту функціонування системи як результату спільної дії підсистем і елементів, що входять до неї. Це виражається в тому, що системі притаманні не тільки властивості кожної її складової, а й низка принципово нових властивостей, системних якостей, породжених взаємодією цих частин [1].

Дослідження інтеграційних процесів складних систем [2, 3] нині показують, що отримання синергетичного ефекту є їх основною економічною метою.

Одним з основних етапів ефективного формування віртуального підприємства є відбір і об'єднання виконавців і партнерів, що мають ключові компетенції для виконання конкретного замовлення відповідно до цілей і завдань проекту [4].

Для забезпечення позитивного синергетичного ефекту при формуванні віртуального підприємства з ремонту локомотивів необхідно уникати дублювання технологічних можливостей агентів. Якщо цю умову висловити через коефіцієнт відповідності ремонтного виробництва [5], то вона матиме вигляд

$$K_{c1} + K_{c2} + K_{c3} + \dots + K_{cn} \rightarrow 1, \quad (1)$$

де  $K_{c1} \dots K_{cn}$  — коефіцієнти відповідності виробництв агентів, що входять до складу віртуального ремонтного підприємства.

Підхід, при якому реалізується прагнення пошуку підприємств-агентів з високим ступенем відповідності вимогам (відповідно високим значенням коефіцієнта відповідності) буде викликати дублювання компетенцій, а значить, частина обладнання, виробничих площ або персоналу буде використовуватися неефективно, що буде викликати негативний синергетичний ефект. Об'єднання підприємств з незначними

можливостями може призвести до нестачі необхідної компетенції віртуального підприємства, що не дасть змоги повною мірою виконувати поставлені завдання. Однак участь підприємств різного ступеня підготовки, але з умовою доповнення компетенцій, буде викликати позитивний синергетичний ефект.

Згідно з [5] коефіцієнт відповідності ремонтного виробництва є комплексним показником і він розраховується на підставі чотирьох компонентів ремонтного виробництва:  $K_c^0$  — обладнання та інструмент,  $K_c^p$  — персонал,  $K_c^s$  — робоче середовище,  $K_c^d$  — документація. З цього випливає, що процес вибору підприємств-агентів для віртуального підприємства з ремонту локомотивів можна сформулювати як оптимізаційну задачу. Цільова функція в такому випадку матиме вигляд

$$\begin{cases} 1 - \sum K_c^d \\ 1 - \sum K_c^o \\ 1 - \sum K_c^s \\ 1 - \sum K_c^p \end{cases} \rightarrow \min \quad (2)$$

$$0 < K_c^i < 1$$

Подана задача (2) повинна розв'язуватися методами багатокритеріальної оптимізації. Усі методи багатокритеріальної оптимізації різні за своєю природою і в загальному випадку дають ефективні (Парето-оптимальні) рішення, що не збігаються між собою. Разом з тим, не можна аргументовано стверджувати, що один з цих методів кращий за інший. А сам факт наявності їх різноманіття часто призводить до протилежних результатів, що свідчить про відсутність одного найкращого методу. Іншими словами, не існує апіорі кращого методу багатокритеріальної оптимізації. А значить, при розв'язанні багатокритеріальної задачі некоректно обмежуватися якимось певним методом, необхідно

використовувати їх сукупність, сформовану особою, що приймає рішення [6].

Усі методи розв'язання багатокритеріальних задач можна умовно розділити на дві групи. У методах першої групи прагнуть скоротити кількість критеріїв до одного метакритерію, для чого вводять додаткові припущення, що стосуються процедури ранжирування критеріїв і порівняння альтернатив. У методах другої групи прагнуть скоротити кількість альтернатив у вихідній множині, виключивши свідомо погані альтернативи [8, 9].

Під час аналізу невідповідностей у [5] було визначено ступінь впливу компонентів ремонтного виробництва на

технологічний процес ремонту у вигляді коефіцієнтів вагомості. Застосування вагових коефіцієнтів частинних критеріїв функції (2) дасть змогу розв'язувати поставлену задачу методами першої групи.

Для проведення обчислень було обрано три ремонтних виробництва-центри та шість виробництв-агентів (таблиця). Як видно з таблиці, серед обраних виробництв є такі, що характеризуються низькими значеннями коефіцієнтів відповідності («А», «1», «2»), високими значеннями коефіцієнтів відповідності («В», «3», «4») і такі, що мають високі й низькі значення коефіцієнтів за різними компонентами («С», «5», «6»).

Таблиця

Коефіцієнти відповідності локомотиворемонтних виробництв за компонентами

$K_c^i$	Виробництва-центри			Виробництва-агенти					
	А	В	С	1	2	3	4	5	6
$K_c^0$	0,33	0,82	0,38	0,26	0,46	0,65	0,84	0,12	0,63
$K_c^p$	0,26	0,76	0,18	0,24	0,58	0,54	0,81	0,26	0,57
$K_c^s$	0,13	0,57	0,86	0,18	0,34	0,61	0,73	0,47	0,23
$K_c^d$	0,18	0,52	0,82	0,2	0,41	0,57	0,78	0,59	0,17

Поставлена задача формування віртуальних підприємств за умови досягнення найбільшого синергетичного ефекту розв'язувалася методами згорток (адитивна, мультиплікативна, мінімаксна) та методом головного критерію (рисунок).

Для виробництва «А» найменші значення метакритерію, отримані методами згорток, відповідають виробництву «4», а значення, отримане методом основного критерію, відповідає виробництву «3». Отриманий результат підтверджує той факт, що застосування методу головного критерію може призводити до певної

похибки внаслідок неврахування впливу інших критеріїв.

Для виробництва «В» найменші значення метакритерію, отримані чотирма методами, відповідають виробництву «1».

Для виробництва «С» найменші значення метакритерію, отримані методами основного критерію, адитивною та мультиплікативною згортками вказують на виробництво «6». Найменший критерій, отриманий мінімаксним методом, відповідає виробництву «2», що пояснюється нечутливістю мінімаксного методу до вихідної множини критеріїв [10].



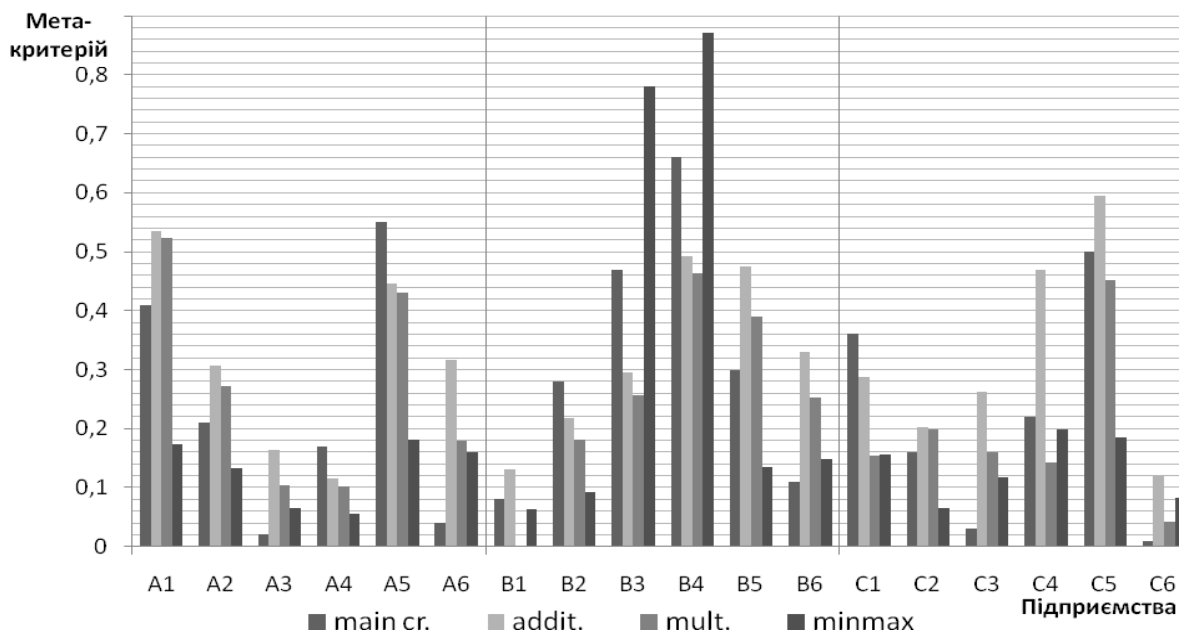


Рис. Порівняння значень метакритерію, отриманих різними методами розв'язання

Загальні результати розрахунків указують на позитивний ефект, тобто кожному ремонтному виробництву-центру із обмеженої множини виробництв-агентів обрано таке об'єднання, з яким віртуальне виробництво буде найбільш ефективним за рахунок позитивного синергетичного ефекту.

**Висновки з дослідження і перспективи, подальший розвиток у даному напрямку.** Результати дослідження інтеграційних процесів складних систем та витрат під час ремонту локомотивів визначають, що основним критерієм формування віртуальних виробництв з ремонту локомотивів повинно бути отримання синергетичного ефекту.

Для досягнення максимального позитивного синергетичного ефекту завдання формування віртуальних виробництв з ремонту локомотивів запропоновано розглядати використовуючи коефіцієнти відповідності виробництв у рамках багатокритеріальної оптимізації.

Розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації проводилося методами згортки (адитивна, мультиплікативна, мінімаксна) та методом головного критерію. Отримані результати підтвердили те, що застосування методу головного критерію призводить до певної похибки внаслідок неврахування впливу інших критеріїв. Найбільшу адекватність у таких умовах показали методи адитивної та мультиплікативної згортки.

### Список використаних джерел

1. Haken, H. Synergetics: Introduction and Advanced Topics [Text] / H. Haken. – Springer; Softcover reprint of the original 1st ed. 2004 edition, 2012. – 768 p.
2. Malakooti, B. Operations and Production Systems with Multiple Objectives [Text] / B. Malakooti. – John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 2014. – 1114 p.
3. Puranam, P. Vanneste, B. Corporate Strategy: Tools for Analysis and Decision-Making [Text] / P. Puranam, B. Vanneste. – Cambridge University Press, 2016. – 322 p.

4. Дацун, Ю. М. Оцінка критеріїв формування віртуального підприємства з ремонту локомотивів [Текст] / Ю. М. Дацун // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – 2017. – № 3(233). – С. 64 – 67.
5. Дацун, Ю. М. Оцінка рівня відповідності локомотиворемонтного виробництва [Текст] / Ю. М. Дацун // Наука та прогрес трансп. Вісн. Дніпр. нац. ун-ту залізн. трансп. – 2017. – № 3(69). – С. 23–31. doi: 10.15802/stp2017/103937.
6. Keeney, R. L. Raiffa H. Decisions with multiple objectives: preferences and value tradeoffs [Текст] / R. L. Keeney, H. Raiffa. – Cambridge University Press, 2003. – 569 p.
7. Пузырь, В. Формирование адаптивного производства по ремонту локомотивов / В. Пузырь, Ю. Дацун // Transport Problems 2017: proceedings IX international scientific conference. – Katowice, 2017. – P. 686 – 690.
8. Marttunen M., Lienert J., Belton V. Structuring problems for Multi-Criteria Decision Analysis in practice: A literature review of method combinations [Text] / M. Marttunen, J. Lienert, V. Belton // European Journal of Operational Research. – 2017. - Volume 263, Issue 1. – p. 1–17. doi:10.1016/j.ejor.2017.04.041
9. Multicriteria analysis of real-life engineering optimization problems: statement and solution [Text] / R. Statnikov. A. Bordetsky. A. Statnikov // Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications. – 2005. - Volume 63, Issues 5–7. – p. e685-e696. doi:10.1016/j.na.2005.01.028
10. Hamacher H. Nickel S. Multicriteria planar location problems [Text] / H. Hamacher. S. Nickel // European Journal of Operational Research. – 1996. - Volume 94, Issue 1. – P. 66-86. doi:10.1016/0377-2217(95)00186-7.

---

Дацун Юрій Миколайович, канд. техн. наук, доцент кафедри експлуатації та ремонту рухомого складу Українського державного університету залізничного транспорту. Тел.: (057)730-19-99. E-mail: remlocomot@gmail.com.

Datsun Yurii cand. of techn. sciences, associate professor department of maintenance and repair of rolling stock Ukrainian State University of Railway Transport. Tel.: (057)730-19-99. E-mail: remlocomot@gmail.com.

Стаття прийнята 18.08.2017 р.

## **ДО 100-РІЧЧЯ О. П. МЧЕДЛОВА-ПЕТРОСЯНА**

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

### **COLLECTION OF SCIENTIFIC WORKS OF THE UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT**

***Випуск 171***

«Збірник наукових праць УкрДУЗТ» включено до списку друкованих (електронних) періодичних видань, що включаються до Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук (Наказ МОН України від 21.12.2015 р. № 1328 (додаток 8)).

Статті друкуються в авторській редакції мовою оригіналу  
Всі статті пройшли подвійне сліпе наукове рецензування.

Відповідальний за випуск Янченко Л. В.

Редактори Еткало О. О., Решетилова В. В.

---

КВ № 21515 - 11415ПР від 27.07.2015 р. Підписано до друку 13.09.2017 р.  
Формат паперу А4. Папір писальний.  
Умовн.друк. арк. 7,0. Тираж 105. Замовлення № .

Видавець Український державний університет залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейсбаха,7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.