

**УДК 504:625.711.1:502.5**

**Хрутьба В.О., д-р техн. наук, Крюковська Л.І.**

### **МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ МЕТАЛУРГІЙНИХ ШЛАКІВ ЯК ДОРОЖНЬО-БУДІВЕЛЬНОГО МАТЕРІАЛУ**

**Анотація.** У статті запропоновано математичні моделі залежності активності металургійних шлаків від їх хімічного складу. Результати моделювання дозволяють прогнозувати властивості шлаків для застосування їх як альтернативного дорожньо-будівельного матеріалу.

**Ключові слова:** альтернативний дорожньо-будівельний матеріал, металургійний шлак, активність, математичні моделі.

**УДК 504:625.711.1:502.5**

**Хрутьба В.А., д-р техн. наук, Крюковская Л.И.**

### **МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВОЙСТВ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ШЛАКОВ КАК ДОРОЖНО-СТРОИТЕЛЬНОГО МАТЕРИАЛА**

**Аннотация..** В статье предложены математические модели зависимости активности металлургических шлаков от их химического состава. Результаты моделирования позволяют прогнозировать свойства шлаков для применения их в качестве альтернативного дорожно-строительного материала.

**Ключові слова:** альтернативный дорожно-строительный материал, металлургический шлак, активность, математические модели.

**UDC 504:625.711.1:502.5**

**Khrutba V. A., Dr. Tech. Sci., Kriukovska L.I.**

### **MATHEMATICAL MODELING OF PROPERTIES OF METALLURGICAL SLAGS AS ROAD-BUILDING MATERIAL**

**Abstract.** In the article mathematical models of metallurgical slag activity depending on their chemical composition proposed. The results of modeling allow predicting characteristics of slag for use as an alternative road-building material.

**Keywords:** Alternative road-building material, metallurgical slag, activity, mathematical models

## **Вступ**

*Дорожнє господарство є споживачем значної кількості природних ресурсів. У будівництві автомобільних доріг витрати на матеріали перевищують 60%. Від їх якості залежить безпека руху, економічна ефективність автомобільного транспорту, а також споживчі властивості (коефіцієнт зчеплення, рівність тощо) і довговічність споруд. Забезпечення ресурсозбереження природних матеріалів можливо за рахунок розширення асортименту заповнювачів та використання нетрадиційних матеріалів (місцевих, штучних, відходів промисловості тощо).*

*Інтенсивні темпи дорожнього будівництва потребують пошуку альтернативних замінників природних будівельних матеріалів. Заміна природних дорожньо-будівельних матеріалів відходами або побічними продуктами промисловості сприяє впровадженню ресурсозберігаючих технологій та зниженню вартості дорожнього будівництва. З технічної та природоохоронної точок зору вторинні матеріали повинні використовуватися так, щоб не погіршувати експлуатаційних і екологічних характеристик автомобільних доріг.*

*Одним із пріоритетних напрямів у сфері використання вторинних ресурсів є подальша розробка технологій і розширення виробництв з переробки багатотоннажних відходів видобувної, металургійної, хімічної та інших галузей промисловості в будівельні матеріали та конструкції. До таких відходів відносяться шлаки металургійної промисловості, зокрема, металургійні шлаки, які є відходами металургійного виробництва [1]. При оцінці шлаків як сировини для дорожньо-будівельних матеріалів важливою характеристикою є хімічний склад, який значно впливає на фізичні властивості шлакових розплавів, структуру і властивості затверділих шлаків.*

*Отже, дослідження властивостей шлаку, аналіз залежності їх активності від хімічного складу дозволить визначити міцнісні характеристики шлаків на окремих металургійних комбінатів. Найбільш ефективним підходом до прогнозування властивостей шлаків є розробка математичних моделей залежності активності від хімічного складу металургійного шлаку, які дозволять обґрунтувати можливість розробки конструкції дорожнього одягу з альтернативними дорожньо-будівельними матеріалами.*

### **Експериментальні та теоретичні дослідження**

Багаторічний досвід дорожніх організацій показує, що вся продукція шлакопереробки економічно вигідна. Розрахункові нормативно-технічні характеристики для основних українських шлаків, а особливо доменних і гранульованих доменних в 1,5-2,0 рази вищі за нормативні показники на продукцію із природних кам'яних матеріалів. Важливим фактором, який стимулює використання шлаків, є постійне загострення енергетичної кризи, так як виробництво продукції із вторинних матеріалів потребує в 2-4 рази менше енергії, ніж для виробництва рівноцінної продукції із природної сировини [2].

Використання металургійних шлаків як заміників природних кам'яних матеріалів у дорожньому будівництві сприяє вирішенню таких проблем:

по-перше, значне вивільнення земельних площ, які займають шлакові відвали, що сприятиме вирішенню екологічних проблем забруднення прилеглих територій і сплати штрафів металургійними комбінатами за розміщення кожної тони шлаку, що покращить їх економічний стан;

по-друге, шлак як ресурс для дорожньої галузі має свою споживчу вартість;

по-третє, це суттєва економія природних кам'яних матеріалів при дорожньому будівництві, яка сприятиме збереженню природних ресурсів країни.

Дослідження властивостей металургійних шлаків як заміників природних кам'яних матеріалів в дорожньому будівництві проводились багатьма авторами. Аналіз публікацій, присвячених проблемі використання відходів промисловості для дорожнього будівництва [3, 4, 5], свідчить, що дослідження вчених спрямовані на вивчення фізико-хімічних властивостей основних видів відходів різних галузей промисловості; розробку теоретичної бази формування штучних будівельних матеріалів і виробів на основі відходів різних галузей промисловості; розробку нормативно-технічної та інструктивної документації на виготовлення і використання будівельних матеріалів з відходів промисловості. В той самий час, окремого дослідження потребує аналіз властивостей шлаку як дорожньо-будівельного матеріалу, що визначає область його використання.

Основним показником міцності шлаку як матеріалу дорожнього одягу є активність, що визначається як границя міцності при стиску зразків у водонасиченому стані протягом 28 діб. На активність шлаків впливають: процентний вміст оксидів кремнію, алюмінію, кальцію, магнію, заліза. Оптимальний вміст цих оксидів є основою для розрахунку конструкцій

дорожнього одягу (КДО) при впровадженні технологій будівництва та реконструкції автомобільних доріг з використанням шлаків.

**Гідралічна активність шлаків оцінюється модулем основності (Mo), модулем активності (Ma) і коефіцієнтом якості (K) [6]:**

$$Mo = \frac{CaO + MoO}{SiO_2 + Al_2O_3} \% . \quad (1)$$

$$Mo = \frac{Al_2O_3}{SiO_2} \% . \quad (2)$$

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + MgO}{SiO_2 + TiO_2} \% . \quad (3)$$

$$K = \frac{CaO + Al_2O_3 + 10}{SiO_2 + TiO_2 + (MgO - 10)} \% . \quad (4)$$

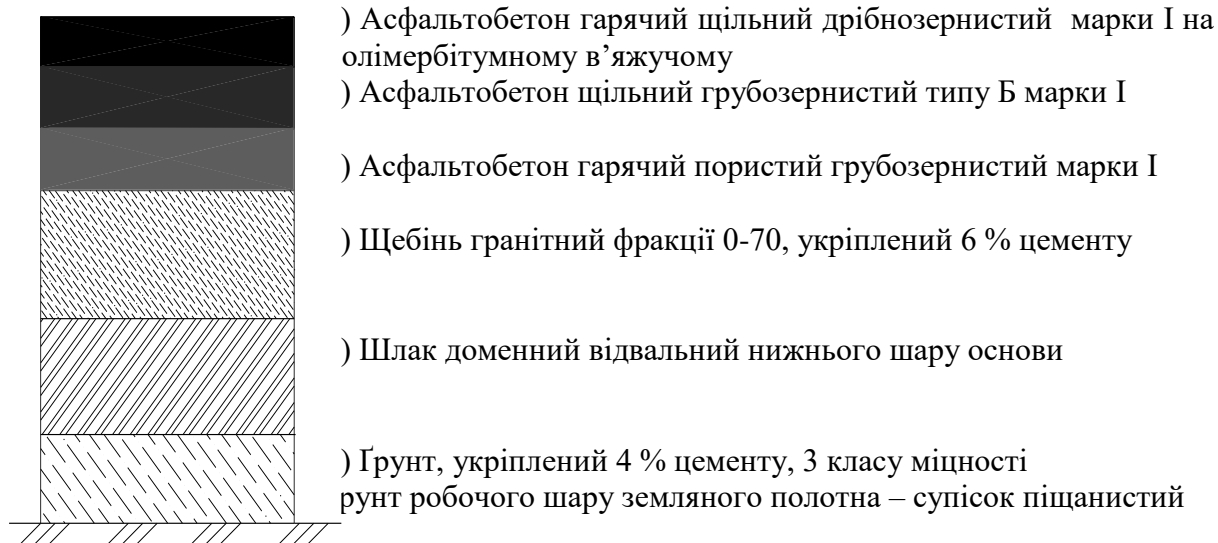
За величиною модуля основності шлаки підрозділяють на п'ять груп: високоосновні ( $Mo > 2,5$ ), основні ( $Mo = 2,5-1,5$ ), середні ( $Mo = 1,0-1,5$ ), кислі ( $Mo = 1,0-0,5$ ) і ультракислі ( $Mo < 0,5$ ). Ця характеристика є важливою при оцінці шлаків як сировини для отримання будівельних матеріалів.

**Менше значення активності шлаків зумовлює їх меншу міцність і вимагає призначення конструктивного шару більшої товщини і навпаки, більша активність відповідає їх більшій міцності і вимагає конструктивного шару меншої товщини.**

За результатами досліджень запропонована одна із КДО з використанням металургійних шлаків: (асфальтобетон гарячий щільний дрібнозернистий марки І на полімербітумному в'язучому; асфальтобетон щільний грубозернистий типу Б марки І; асфальтобетон гарячий пористий грубозернистий марки І; щебінь гранітний фракції 0-70, укріплений 6 % цементу; шлак доменний відвальний; ґрунт, укріплений 4 % цементу 3 класу міцності) (рис.1) [7].

Для визначення впливу властивостей шлаків різних металургійних комбінатів на міцність проведемо аналіз експериментально-статистичних даних, що дозволяє сформуванню ранжований ряд показників активності шлаків різних металургійних комбінатів і визначити передумови формування відповідної КДО.

Об'єктом дослідження в роботі є металургійні шлаки таких комбінатів, як ВАТ «Криворіжсталь», ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат», ВАТ «ММК імені Ілліча», ВАТ «Запоріжсталь», ВАТ «Азовсталь», ВАТ «ЄМЗ». Виходячи із існуючих технологічних даних та апріорної інформації, відомо, що множиною умов  $X$ , які впливають на міцнісні характеристики шлаків є такі фактори:  $X_1$  - вміст  $SiO_2$ ,  $X_2$  - вміст  $Al_2O_3$ ,  $X_3$  - вміст  $CaO$ ,  $X_4$  - вміст  $MgO$ ,  $X_5$  - вміст  $FeO_2$ . Вихідною величиною є  $Y$  - активність  $R_{28}$ , МПа.



**Рисунок 1** – Конструкція дорожнього одягу з використанням шлаків доменних відвальних при будівництві автомобільних доріг I категорії

В табл.1 приведено експериментально визначені значення хімічного складу шлаку двох металургійних комбінатів та розраховане значення їх активності.

Обробку результатів дослідження та оцінку параметрів математичної моделі здійснюємо методом найменших квадратів (МНК). Параметри багатофакторної моделі обчислюють за формулою [8]:

$$B = (X'X)^{-1} X'Y \quad (5)$$

де  $x$  – матриця незалежних змінних;  $x'$  - транспонована матриця  $x$  ;  
 $y$  - вектор значень залежної змінної.

Використання МНК для обробки результатів дозволило одержати рівняння регресії, які описують залежність активності шлаків від їх хімічного складу. Наприклад, модель для ВАТ «Криворіжсталь» має такий вигляд:

$$Y_1 = 8,846 - 0,388 \cdot X_1 + 0,302 \cdot X_2 + 0,199 \cdot X_3 + 0,376 \cdot X_4 - 6,781 \cdot X_5. \quad (6)$$

Таблиця 1 – Хімічний склад шлаку металургійних комбінатів

№ проби	Вміст					Активність $R_{28}$ , МПа	
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	FeO <sub>2</sub>	експериментальна	розрахункова
	$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$X_5$	$Y$	$\hat{Y}$
Шлаки доменні відвальні ВАТ «Криворіжсталь»							
1	39,2	8,9	52,8	6,4	0,3	7,2	7,2035
2	39,9	9,8	50,2	5,9	0,33	6,3	6,29487
3	38,2	8,8	51,8	4,6	0,3	6,8	6,6855
4	38,3	9,7	49,9	6,3	0,34	7	6,90836
5	38,4	7,6	51,8	5,2	0,3	6,5	6,4711
6	37,9	7,6	50,8	4,6	0,35	5,9	5,90145
7	37,7	7,7	51,1	5	0,3	6,6	6,5584
8	37,3	9,8	51	5,6	0,32	7,4	7,41788
9	37,5	8,2	49,8	4,7	0,3	6,4	6,4155
10	38,6	9,9	51,8	4,7	0,3	6,9	6,9001
Шлаки доменні відвальні ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат»							
1	37	9,1	51,8	5,6	0,47	6,75	6,7404
2	36,75	9	51,7	5,5	0,39	6,65	6,6846
3	36,7	8,78	51,9	5,45	0,47	6,62	6,6041
4	36,5	8,7	50,8	5,2	0,45	6,61	6,5952
5	36,3	8,69	50,3	5,1	0,38	6,58	6,5839
6	36,4	8,1	50,9	4,8	0,36	6,46	6,4356
7	36	7,87	50,1	4,2	0,45	6,42	6,3564
8	35,9	7,75	50,7	4,1	0,45	6,3	6,2952
9	35,8	7,8	50,9	4,16	0,47	6,25	6,2816
10	35	7,39	50,5	4,09	0,42	6	6,0461

Модель для ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат» така:

$$Y_2 = -0,373 + 0,17 \cdot X_1 + 0,29 \cdot X_2 - 0,027 \cdot X_3 - 0,068 \cdot X_4 - 0,077 \cdot X_5. \quad (7)$$

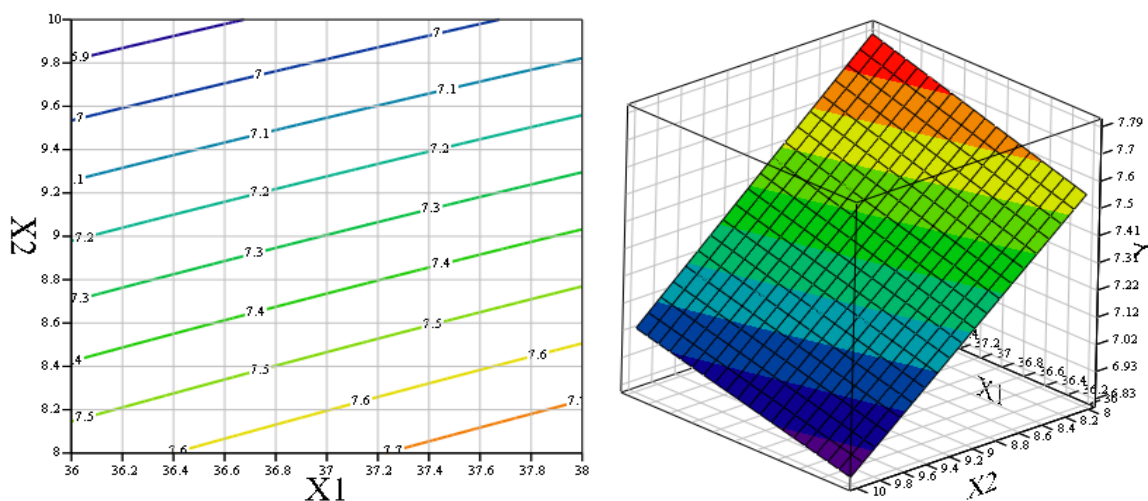
Коефіцієнти регресії показують, наскільки зміниться активність при зміні відповідного фактору на одиницю при умові, що інші фактори, включенні у рівняння, лежить на середньому рівні. Наприклад, для шлаків ВАТ «Криворіжсталь» при середніх значень інших хімічних сполук збільшення кількості SiO<sub>2</sub> на один бал сприяє зменшенню активності на 0,388 МПа. Для шлаків ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат» збільшення SiO<sub>2</sub> на один бал сприяє збільшенню активності на 0,17 МПа.

Оцінка адекватності одержаних моделей за критерієм Фішера дозволила стверджувати, що одержані моделі є адекватними, тобто підтверджується гіпотеза про те, що кількісна оцінка зв'язку між залежною і незалежними змінними в моделі є суттєвою.  $F_{\text{табл}}(0,95)$  для моделей дорівнює 5,32. Так як  $F_p$

= 2,1129, а  $F_{T=}$  то  $2,1129 < 5,32$ . Регресійні рівняння вважається адекватними, так як виконується співвідношення  $F_p < F_T$ .

Одержані моделі дозволяють прогнозувати властивості шлаків окремих металургійних комбінатів для розробки відповідної конструкції дорожнього одягу.

Графічна інтерпретація результатів обчислювального експерименту для ВАТ «Криворіжсталь» представлена на рис.2 у вигляді ізоліній та ізоповерхні активності. Представлені діаграми дозволять визначати значення активності шлаку в залежності від зміни вмісту ( $\text{SiO}_2$   $X_1$ ) та вмісту  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $X_2$ ) при стабілізації інших факторів на середньому рівні.



н

Рисунок 2 – Ізолінії та ізоповерхні активності шлаку ВАТ «Криворіжсталь»

Використання багатofакторного кореляційно-регресійного аналізу залежності активності шлаків від їх хімічного складу дозволило визначити міцнісні характеристики шлаків для кожного металургійного комбінату. В ранжованому ряді активність шлаків металургійних комбінатів розміщуємо в такій послідовності: ВАТ «Криворіжсталь» ( $R_{28}=6,7$  МПа); ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат» ( $R_{28}=6,464$  МПа); ВАТ «ММК імені Ілліча» ( $R_{28}=6,25$  МПа); ВАТ «Запоріжсталь» ( $R_{28}=5,89$  МПа); ВАТ «Азовсталь» ( $R_{28}=5,53$  МПа); ВАТ «ЄМЗ» ( $R_{28}=5,3$  МПа).

### Висновки

1. Показано, що застосування металургійного шлаку як дорожньо-будівельного матеріалу сприяє значному вивільненню земельних площ, які займають шлакові відвали, є ресурсом для дорожньої галузі і має свою споживчу

вартість. Це дозволяє суттєво економити природні кам'яні матеріали при дорожньому будівництві і сприяє збереженню природних ресурсів країни.

2. Встановлено, що товщина конструктивного шару дорожнього одягу залежить від міцнісних характеристик шлаку та значення його активності.

3. Розроблено математичні моделі залежності активності шлаків від їх хімічного складу, що дозволяє прогнозувати міцнісні характеристики шлаків для ВАТ «Криворіжсталь» ВАТ «Дніпровський металургійний комбінат», ВАТ «ММК імені Ілліча», ВАТ «Запоріжсталь», ВАТ «Азовсталь», ВАТ «ЄМЗ» і обґрунтувати доцільність впровадження тієї чи іншої технології будівництва і реконструкції автомобільних доріг.

### **Література**

1. Копач П.І. Проблема зниження відходності господарських комплексів гірничо-металургійного регіону та шляхи її вирішення / П.І. Копач, Я.Я. Сердюк // Екологія і природокористування. - 2011. - Випуск 14. - С.161-177.

2. Скорченко В.Ф. Застосування металургійних шлаків при будівництві автомобільних доріг як заміників традиційних дорожньо-будівельних кам'яних матеріалів. / Л.І. Крюковська, В.Ф. Скорченко // Тези доповідей. – К: НТУ, 2007. - с.124.

3. Шаповалов Н.А. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков / Н.А. Шаповалов, Л.Х. Загороднюк, И.В. Тикунова, А.Ю. Шекина // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1-2. – С. 439-443.

4. Пугин К. Г. Отходы черной металлургии для дорожных одежд жесткого типа / К. Г. Пугин, В. С. Юшков // Молодой ученый. — 2012. — №6. — С. 45-49.

5. Крюковська Л.І. До еколого-економічної оцінки заміни природних матеріалів металургійними шлаками при будівництві доріг / Л.І.Крюковська // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ – 2013. – Вип. 27. — С.359-363.

6. Розробка технологій поводження з відходами в транспортно-дорожньому комплексі Звіт про виконання науково-дослідної роботи / Держбюджетна тема № 76 № держреєстрації 0107U009610; Мін-во освіти Україна, Національний транспортний університет. — К., 2008. — 110 с. — Деп. в ВІНИТИ 13.06.02, № 145432.

7. Хрутьба В.О. Техніко-економічне та екологічне обґрунтування застосування шлаків чорної металургії у дорожньому будівництві / В.О. Хрутьба, Л.І.Крюковська // Збірка тез доповідей VIII Міжнародної наукової конференції аспірантів і студентів «Охорона навколишнього середовища та раціональне використання природних ресурсів». – Донецьк:, 2009. - с.32.

8. Горкавий В.К. Математична статистика: - Навчальний посібник. / В.К. Горкавий, В. В. Ярова // – К.: ВД «Професіонал», 2004. - 384 с.

### **Рецензенти:**

Внукова Н.В., д-р техн. наук, Харківський національний автомобільно-дорожній університет.

Оніщенко А.М., канд. техн. наук, Національний транспортний університет.

### **Reviewers:**

Vnukova N.V., Dr. Tech. Sci., Kharkiv National Automobile and Highway University.

Onischenko A.M., Cand. Eng. Sci. (Ph.D.) National Transport University.

Стаття надійшла до редакції: **25.03.2017 р.**