

**ДЕФОРМАТИВНІСТЬ БЕТОНУ НА ОСНОВІ В'ЯЖУЧОГО З ПИЛОМ КЛІНКЕРНИХ ПЕЧЕЙ**

**DEFORMABILITY OF CONCRETE BASED ON A BINDER WITH CLINKER KILN DUST**

**Дворкін Л.Й., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Житковський В.В., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Фурсович М.О., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0003-3584-2083 (Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)**

**Dvorkin L., doctor of technical sciences, professor, ORCID: 0000-0001-8759-6318, Zhitkovsky V., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-1710-6082, Fursovych M., candidate of technical sciences, associate professor, ORCID: 0000-0003-3584-2083 (National University of Water Management Environmental Engineering, Rivne)**

**Стаття присвячена дослідженню впливу складу в'язучого низької водопотреби, що містить доменний шлак та пил цементних печей, а також технологічних факторів на показники тріщиностійкості, деформації усадки. Показано, що величина модуля пружності бетонів на даних в'язучих тісно скорельована з їхньою міцністю при стиску і може орієнтовно розраховуватись за допомогою відомих базових залежностей.**

**The article is devoted to the study of the influence of the composition of the binder of low water demand, containing blast-furnace slag and cement kiln dust, as well as technological factors on crack resistance, shrinkage deformation and frost resistance. The analysis of the influence of the structure of cement stone on the elastic properties of concrete was carried out. The main calculation formulas are considered that allow predicting the modulus of elasticity, taking into account the structure of cement stone and concrete. The expediency of using the ratio of compressive and tensile strength as a criterion for the crack resistance of concrete is substantiated. The criterion of crack resistance of concrete based on dust and slag binder has been experimentally determined. The influence of the binder composition, the content of the naphthalene-formaldehyde type superplasticizer and the water-binding ratio on the values of this criterion was studied. The influence of the age of concrete on dust-slag binder on its deformability index is shown.**

**It is shown that the value of the elasticity modulus of concrete on these binders is closely accelerated with their compressive strength and can be**

roughly calculated using known basic dependencies. The results of determining the shrinkage deformations of concrete are given and the modulus of crack resistance is calculated, which is the ratio of tensile strength to the magnitude of shrinkage deformations. It is shown that concretes based on dust and slag binder are characterized by increased values of deformability.

**Ключові слова:** в'язуче, водопотреба, пил, клінкер, шлак, бетон, усадка, тріщиностійкість.

binder, water consumption, dust, clinker, slag, concrete, shrinkage, crack resistance.

**Вступ.** При випалюванні цементного клінкеру у значних обсягах утворюється пил, основна маса якого вловлюється електрофільтрами і, як правило, повертається в сировинну суміш. Повторне використання пилу-винесення може несприятливо впливати на властивості як сировинних сумішей, так і готового продукту – портландцементу, знижувати стійкість вогнетривкої футеровки печей та ін. Відомий ряд інших можливих напрямків використання пилу-винесення, у тому числі для отримання композиційних в'язучих матеріалів [1-3]. В останні роки все більш актуальним є виробництво композиційних в'язучих низької водопотреби (ВНВ), що дозволяють за рахунок використання різноманітних мінеральних добавок за високої тонкості помелу та введення добавок суперпластифікаторів суттєво збільшити міцність при значному зменшенні питомого вмісту клінкеру.

Певна гідравлічна активність пилу-винесення та її висока дисперсність є передумовами для її використання як мінеральної добавки у складі в'язучих низької водопотреби. Підвищений вміст у пилу лугів та вільного вапна обумовлюють доцільність спільного застосування пилу та доменних гранульованих шлаків, які не лише «гасять» негативний вплив зазначених компонентів пилу, але під їх дією додатково активізуються.

Метою дослідження було встановити впливу складу цементно-пилошлакового в'язучого та складу бетону на його основі на деформативні характеристики та морозостійкість.

**Матеріали та методи досліджень.** Для отримання в'язучого використовували портландцемент СЕМ І 42.5 та пил-віднесення клінкеропалюючих печей (Дікергоф-Україна, м. Здолбунів), а також доменний гранульований шлак (питома поверхня  $270 \text{ м}^2/\text{кг}$ ) (м. Кривий Ріг). Як суперпластифікатор використовували добавку нафталінформальдегідного типу С-3. Помел в'язучих здійснювали в лабораторному млині до питомої поверхні  $450 \text{ м}^2/\text{кг}$ . При помелі добавку суперпластифікатора вводили порошкоподібному вигляді. При проведенні досліджень також було використано: пісок з  $M_{кр}=2,0$ , щебінь 5...20 мм. Частка піску у суміші заповнювачів 0,5.

Таблиця 1

## Хімічний склад компонентів в'язучого

Назва матеріалу	Вміст оксидів, %									
	п.п.п.	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	CaO <sub>в</sub>
Пил електро-фільтрів	24,07	12,22	3,41	2,05	49,01	0,84	5,29	2,78	0,55	3,10
Доменний шлак	-	39,52	6,49	0,12	47,13	3,10	1,74	-	-	-
Цемент	-	22,5	5,26	4,06	66,35	0,65	0,26	0,14	0,22	0,33

**Результати експериментів та їх аналіз.** Особливості порової структури, склад та структура цементного каменю, його об'ємна концентрація повинні відобразитися на деформативних властивостях бетонів [4]. Г.К. Пауерсом було показано [5], що модуль пружності цементного каменю  $E_k$  пов'язаний з об'ємом пор виразом:

$$E_k = (1 - V_p)^3 E_{k.o}, \quad (1)$$

де  $E_{k.o}$  – модуль пружності гелево-кристалічної фази цементного каменю.

При розгляді бетону як двофазової системи зі сферичними частинками, рівномірно розподіленими в цементному каменю модуль пружності розраховується [34] за допомогою теоретичного виразу:

$$E_b = [V_k + (2 - V_k)E_z / E_k] / 2 - V_k + V_k E_z / E_k. \quad (2)$$

Аналіз даного виразу показує, що модуль пружності бетону повинен зростати зі збільшенням модуля пружності цементного каменю та зменшенням його вмісту в бетоні.

Наявні літературні дані про вплив добавок ПАР на модуль пружності бетону суперечливі. Більшість досліджень вважає, що введення ПАР знижує модуль пружності в результаті адсорбційного модифікування структури цементного каменю і виникнення в гідратних оболонках зерен цементу структурних елементів, що викликають збільшення поверхні ковзання частинок. При введенні пластифікуючих добавок необхідно враховувати поряд з модифікуванням структури ефекти зменшення пористості цементного каменю і зменшення пористості цементного каменю та зменшення його об'єму в бетоні.

Проаналізувавши експериментальні результати ряду досліджень В.Г. Батраков прийшов до висновку [6], що для литих бетонів введення добавки суперпластифікатора при незначному підвищенні міцності бетону призводить до маловідчутного зменшення модуля пружності. В той же час, при використанні суперпластифікатора для зменшення В/Ц та збільшення міцності, модуль пружності бетону може суттєво збільшуватися.

Характер та кількісний вплив добавок ПАР суттєво залежить від виду та мінералогічного складу в'язучих, властивостей добавок.

Для прогнозування модуля пружності бетонів запропонований [7] ряд емпіричних формул, що пов'язують його з міцністю при стиску. При проектуванні конструкцій для прогнозування модуля пружності бетону при напруженні його у віці  $\tau$  широко застосовують залежності типу:

$$E_{\sigma} = \frac{E_m R_{\sigma\tau}}{\rho + R_{\sigma}} \quad (3)$$

де  $R_{\sigma\tau}$  – кубикова міцність бетону на стиск у віці  $\tau$ , діб;  $E_m$  і  $\rho$  – емпіричні контакти. В будівельних нормах рекомендується значення  $E_m = 52000$  та  $\rho = 23$ .

Європейським комітетом по бетону і нормами ряду країн рекомендуються для прогнозування модуля пружності залежності типу:

$$E_{\sigma} = C(R_{\sigma\tau})^V \quad (4)$$

де  $C$  і  $V$  – деякі емпіричні контакти.

Різновидом залежностей виду (4) є формула Уокера:

$$E_{\sigma} = A\sqrt{R_{\sigma}} \quad (5)$$

де  $A$  – коефіцієнт, що приймається в середньому 19000 (при ОК=20...26 см  $A=17500$ ; ОК=2...4 см  $A=19500$ ; ОК=8-10 см  $A=18700$ ).

Найбільша збіжність розрахункових та експериментальних даних модуля пружності досліджуваних бетонів по даним [7] має місце при використанні формули (3). Розходження між значеннями  $E_{\sigma}$ , вирахованими по формулам (3) та (5) зростають по мірі підвищення міцності бетону.

Модуль пружності бетонів тісно пов'язаний з його деформативністю та відповідно з тріщиностійкістю. Для характеристики деформативності бетонів запропоновані різні критерії [7]. Одним з найбільш простих є відношення границі міцності при розтягу або згині до величини статистичного або динамічного модуля пружності ( $E_{дин}$ ). Експериментально показано [4], що відношення міцності бетону на розтяг при розколюванні ( $R_{р.р.}$ ) до  $E_{дин}$ , так звана «умовна розтяжність», близько до величини граничної деформації при розтягу, пряме визначення якої достатньо трудомістке. Співвідношення між значеннями  $E_{\sigma}$  та  $E_{дин}$  для бетонів знаходиться в інтервалі 0,87-0,95. Менші значення  $E_{\sigma}/E_{дин}$  характерні для бетонів з границею міцності при стиску менше 25МПа.

Враховуючи високий рівень кореляції модуля пружності бетону з міцністю при стиску, очевидно, поряд з критерієм  $R_{\sigma.р.}/E_{\sigma}$  для оцінки деформативності та тріщиностійкості бетону може бути використано і безпосередньо відношення міцності бетону на розтяг до міцності на стиск ( $R_{\sigma.р.}/R_{\sigma.ст.}$ ). Це відношення, як відомо [7], збільшується по мірі підвищення однорідності структури бетону і зменшення кількості різних дефектів, що сприяють концентрації напружень. Всі фактори, що сприяють зчепленню цементного каменю із заповнювачами, найбільш сильно впливають на міцність бетону при розтягу. Величину  $R_{\sigma.р.}/R_{\sigma.ст.}$  визначали для бетонів,

склади яких приведені в табл.2 у віці 28, 90 та 180 діб. Окрім того, для порівняння визначали відношення  $R_{б.р.}/R_{б.ст}$  для двох складів бетону на бездобавочному портландцементі М500, що забезпечують міцність бетону в 28 діб 30 та 60 МПа.

Таблиця 2

Співвідношення  $R_{б.р.}/R_{б.ст}$  для бетонів на в'язучих з композиційною мінеральною добавкою та бездобавочному портландцементі

№	Вміст шлаку та пилу в'яжучому, %	Вміст СП, % від маси в'язучого	Водовміст, кг/м <sup>3</sup>	В/В'яз	Міцнісні показники бетону, МПа, та їх співвідношення у віці								
					28 діб			90 діб			180 діб		
					$R_{б.р.}$	$R_{б.ст}$	$\frac{R_{б.р.}}{R_{б.ст}}$	$R_{б.р.}$	$R_{б.ст}$	$\frac{R_{б.р.}}{R_{б.ст}}$	$R_{б.р.}$	$R_{б.ст}$	$\frac{R_{б.р.}}{R_{б.ст}}$
1	40	-	160	0,6	0,17	27,5	0,0062	0,14	1,25	0,112	0,12	1,36	0,0882
2		0,3	160	0,6	0,15	34,1	0,0044	0,14	1,25	0,112	0,12	1,36	0,0882
3		0,3	130	0,3	0,11	66,3	0,0017	0,10	1,17	0,0855	0,15	1,34	0,1119
4		0,6	130	0,3	0,12	62,1	0,0019	0,10	1,17	0,0855	0,15	1,34	0,1119
5	60	-	160	0,6	0,11	65,4	0,0017	0,10	1,17	0,0855	0,15	1,34	0,1119
6		0,3	160	0,6	0,09	59,5	0,0015	0,10	1,17	0,0855	0,15	1,34	0,1119
7		0,3	130	0,3	0,18	28,3	0,0064	0,15	1,27	0,1181	0,12	1,37	0,0876
8		0,6	130	0,3	0,17	33,5	0,0051	0,15	1,27	0,1181	0,12	1,37	0,0876
9	-	-	160	0,6	0,16	31,4	0,0051	0,11	1,28	0,0859	0,09	1,37	0,0657
10	-	-	130	0,3	0,08	62,8	0,0013	0,07	1,26	0,0556	0,05	1,37	0,0365

Примітка: Склади бетонів 1-8 відповідають складам, приведеним в табл.1, склади 9,10 – на бездобавочному портландцементі М500.

Для оцінки міцності бетону на розтяг використовували метод випробування зразків –кубів шляхом розколювання стискаючим навантаженням [7].

Аналізуючи результати дослідів, приведені в табл.2, можна відмітити, що поряд із загальною тенденцією зменшення  $R_{б.р.}/R_{б.ст}$  з віком для бетонів з композиційною мінеральною добавкою (пил+шлак) та добавкою суперпластифікатора ця тенденція виражена слабше. Так, якщо для бетонів на композиційному в'язучому з 28 добовою міцністю на стиск 27,5-33,5 у віці 28 діб  $R_{б.р.}/R_{б.ст}$  складає 0,044...0,062; 90 діб - 0,112; 180 діб - 0,082, то

для бетону на портландцементі відповідно 0,051; 0,0859; 0,0657. Для бетонів з 28-добовою міцністю на стиск 59,5-66,3 МПа на композиційному в'язучому  $R_{б,р}/R_{б,ст}$  - 0,0015; 90 діб - 0,0855; 180 діб - 0,1119. Для бетону на портландцементі ці відношення рівні відповідно 0,07; 0,0556; 0,0365.

Тріщиностійкість бетону в значній мірі визначається також усадочними деформаціями. А.Е. Десов запропонував як один з критеріїв тріщиностійкості цементного каменю так званий модуль Т:

$$T = R_p / \varepsilon_{ус}, \quad (6)$$

де  $R_p$  – міцність зразків на розтяг;  $\varepsilon_{ус}$  - величина усадочних деформацій до моменту появи тріщин.

Модуль Т при співставних витратах цементного тіста та незмінних заповнювачах може слугувати, очевидно, і для порівняльної характеристики тріщиностійкості бетонів.

На усадці бетонів позначаються багаточисленні фактори, вирішальним з яких є витрата води. При незмінній витраті води в суміші величина  $\varepsilon_{ус}$  мало залежить від витрати цементу та Ц/В [4].

Усадочні деформації бетонів, склади яких приведені в табл.2 визначали за допомогою штативного прибору, оснащеного індикатором часового типу з ціною поділки 0,001 мм. Зразки зберігали при температурі  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  і відносній вологості  $75 \pm 5\%$ . Криві усадочних деформацій приведені на рис.1. Їхній аналіз показує, що для всіх досліджуваних складів усадочні деформації стабілізуються до віку 100 діб.

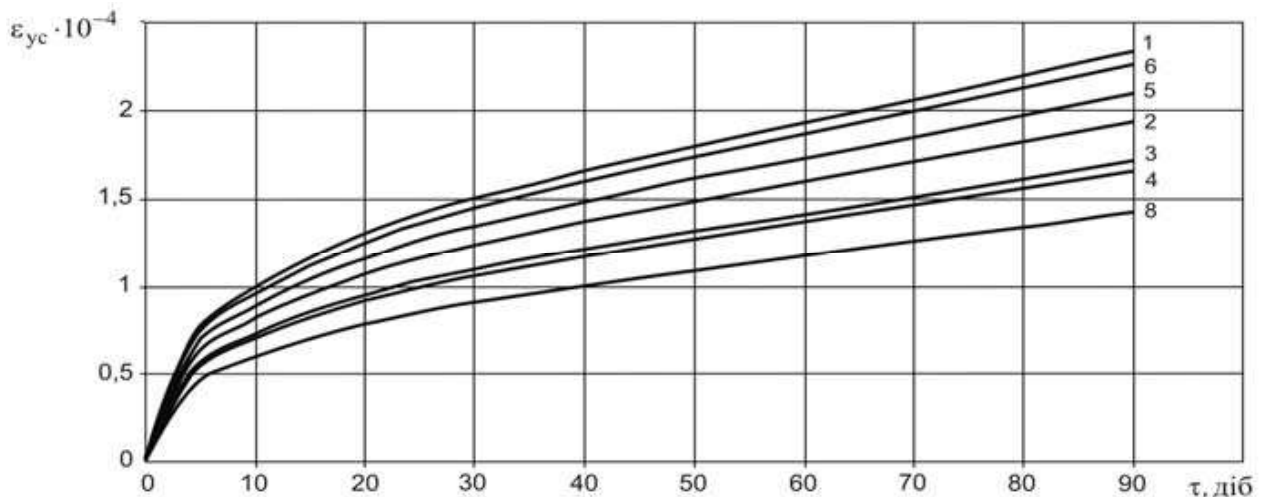


Рис.1. Криві усадочних деформацій  
Номери кривих відповідають складам, наведеним в табл.2

Граничні усадочні деформації бетонів, що досягаються до 100-добового віку в залежності від складу коливається в інтервалі від 1,4 до 2,4 ( $\times 10^{-4}$ ). Найбільш низькі значення осадки характерні для бетонів з мінімальним

вмістом води (130 л/м<sup>3</sup>), композиційної мінеральної добавки (40%) і суперпластифікатора (0,3%). При постійному водовмісті усадочні деформації дещо збільшуються із збільшенням вмісту мінеральної добавки і суперпластифікатора. До 7 добового віку усадка сягає до 30% граничних значень, 28 діб – 50%, 90 діб – 80-90%.

В табл.3 приведені для досліджуваних складів бетону значення усадочних деформацій і модуля тріщиностійкості у віці 28 та 90 діб, з яких слідує, що

всі склади з мінімальною величиною  $\epsilon_{ус}$ , мають максимальне значення модуля Т.

У відповідності із сучасними уявленнями бетонознавства [8,4] морозостійкість бетону визначається комплексом факторів, і в першу чергу, їхньою капілярною пористістю, а також співвідношенням об'ємів відкритих капілярних та закритих повітряних пор. Суттєве значення поряд з хіміко-мінералогічним складом цементного клінкеру має вид і вміст мінеральних добавок.

Таблиця 3

Значення усадочних деформацій  $\epsilon_{ус}$  і модуля тріщиностійкості бетонів

№ п.п. складів бетону	Значення $\epsilon_{ус}$ та модуля Т для бетонів у віці					
	28 діб			90 діб		
	$\epsilon_{ус}$	R <sub>б.р.</sub> , МПа	R <sub>б.р.</sub> / $\epsilon_{ус}$	$\epsilon_{ус}$	R <sub>б.р.</sub> , МПа	R <sub>б.р.</sub> / $\epsilon_{ус}$
1	1,5	0,17	0,113	2,3	0,14	0,061
2	1,2	0,15	0,125	1,9	0,14	0,074
3	1,1	0,11	0,100	1,7	0,10	0,059
4	1,0	0,12	0,120	1,7	0,10	0,059
5	1,3	0,11	0,085	2,1	0,10	0,048
6	1,4	0,09	0,064	2,3	0,10	0,043
7	1,1	0,18	0,164	1,7	0,15	0,088
8	0,9	0,17	0,189	1,4	0,15	0,107

**Висновки та рекомендації.** Величина модуля пружності бетонів на цементнопилошлаковому в'язучому низької водопотреби тісно скорельована з їхньою міцністю при стиску і може орієнтовно розраховуватись за допомогою відомих базових залежностей. Аналіз експериментальних значень

відношення міцності бетонів на розтяг при розколюванні до міцності на стиск і зміни їх в часі дозволяє вважати, що бетони на цементнопилшлаковому в'язучому низької водопотреби мають підвищену деформативність та тріщиностійкість. Про це свідчать також зміни усадочних деформацій та розрахункові значення модуля тріщиностійкості бетонів, тобто відношення міцності на розтяг до величини усадочних деформацій.

1. Дворкин Л. Эффективные цементно-золевые бетоны и растворы / Дворкин Л., Дворкин О. – Palmarium Academic Publishing.- 2015. – 436 с.

Dvorkin L. Effektivnyye tsementno-zol'nyye betony i rastvory / Dvorkin L., Dvorkin O. – Palmarium Academic Publishing.- 2015. – 436 s.

2. Дворкин Л.И. Цементные бетоны с минеральными наполнителями / Дворкин Л.И., Соломатов В.И., Выровой В.Н., Чудновский С.М. – К.: Будівельник, 1991. – 137с.

Dvorkin L.I. Tsementnyye betony s mineral'nymi napolnitelyami / Dvorkin L.I., Solomatov V.I., Vyrovoy V.N., Chudnovskiy S.M. – K.: Budivelnik, 1991. – 137 s.

3. Бутт Ю.М. Химическая технология вяжущих материалов / Бутт Ю.М., Сычев М.М., Тимашев В.В., - М.: Высш.шк., 1980- 472 с.

Butt Y.M. Khimicheskaya tekhnologiya vyazhushchikh materialov / Butt Y.M., Sychev M.M., Timashev V.V., - M.: Vyssh.shk., 1980- 472 s.

4. Баженов Ю.М. Технология бетона. - М.: АСВ, 2007 - 528 с.

Vazhenov Y.M. Tekhnologiya betona. - M.: ASV, 2007 - 528 s.

5. Powers T.C., Brownyard T.L. Studies and physical properties of hardened Portland cement paste. – Proc. Amer. Concrete Inst., 1947, №43.

Powers T.C., Brownyard T.L. Studies and physical properties of hardened Portland cement paste. – Proc. Amer. Concrete Inst., 1947, №43

6. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. – М.: 1992. – вып.2.

Batratkov V.G. Modifitsirovannyye betony. Teoriya i praktika. – M.: 1992. – vyp.2.

7. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. Основы бетоноведения. М.: С-Петербург. – 2006. – 692с.

Dvorkin L.I., Dvorkin O.L. Osnovy betonovedeniya. M.: S-Peterburg. – 2006. – 692s.

8. Физико-химическая механика дисперсных структур/ Под ред. П.А. Ребиндера. – М.: Наука, 1966. – 400с.

Fiziko-khimicheskaya mekhanika dispersnykh struktur/ Pod red. P.A. Rebindera. – M.: Nauka, 1966. – 400s.