

Міністерство освіти і науки України
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Technical University of Moldova (Молдова)
University North (Хорватія)
Development and Educational Centre for the Metal Industry –
Metal Centre Čakovec (Хорватія)



Metalska Jezgra



МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТІВ (Семінар МОБК)

Матеріали міжнародної науково-технічної конференції

Одеса, 5-6 грудня 2024

MODELLING AND OPTIMIZATION OF BUILDING COMPOSITES (Seminar of MOBC)

Materials to the International Scientific and Technical
Conference

Odesa, December 5-6, 2024

Міжнародна науково-технічна конференція з моделювання та оптимізації будівельних композитів (**Семінар МОБК**) продовжує традицію кафедри процесів та апаратів в технології будівельних матеріалів. З моменту заснування кафедрою керував заслужений діяч науки і техніки, д.т.н., професор В.А. Вознесенський. Віталій Анатолійович створив та очолював Раду з комп'ютерного матеріалознавства при Міжнародній інженерній академії. Під його керівництвом з 1996 по 2008 рік в Одеському домі вчених проводились міжнародні семінари з моделювання та оптимізації композитів (МОК'35-47). У 2014 році пройшов семінар, присвячений 80-річчю В.А. Вознесенського. Матеріали **МОБК** 2024 р. охоплюють питання будівельного матеріалознавства, застосування експериментально-статистичного моделювання в цій області знань та адитивного виробництва (технологія та матеріали). Оргкомітет (patbm@odaba.edu.ua) не завжди поділяє думку авторів.

International Seminar "Modelling and Optimization of Building Composites" continues the tradition of the Department of Chemical Engineering at Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture. The head of the department (from its founding) Professor V.A. Voznesensky (1934-2012), D.Sc., honoured scientist, had organized and headed the Scientific Council on Computational Materials Science at International Academy of Engineering. Under his leadership the International Seminars on Modelling and Optimization of Composites (MOC'35-47) were conducted in 1996-2008, in Odessa House of Scientists. The seminar of 2014 commemorated the 80th anniversary of the birth of Vitaly Voznesensky. The Proceedings of the present seminar cover the issues of building materials science, of experimental-statistical modelling in this field of knowledge, and of additive manufacturing (technology and materials).

Редакційна колегія: **Кровяков С.О.**, д.т.н., проф.; **Хлицов Н.В.**, к.т.н., доц.; **Барабаш І.В.**, д.т.н., проф.; **Гара О.А.**, к.т.н., проф.; **Керш В.Я.**, к.т.н., проф.; **Ляшенко Т.В.**, д.т.н., проф.; **Русу І.В.**, д.т.н., проф.; **Семенова С.В.** к.т.н., доц.; **Суханов В.Г.** д.т.н., проф.; **Аніскін О.**, к.т.н., проф.; **Орешкович М.**, к.т.н., проф.; **Москальова К.**, к.т.н., доц.; **Шерцер М.**, к.е., доц.; **Шинкевич О.С.**, д.т.н., проф.

Друкується за рішенням Вченої Ради Одеської державної академії будівництва та архітектури (протокол №4 від 28 листопада 2024 р.)

Секція 1.

МОДЕЛІ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА РІЗНОГО РІВНЯ

АДАПТАЦІЯ-ЗДАТНІСТЬ ІСНУЮЧОГО ІСНУВАТИ

Вировой В.М., Семенова С.В., Коробко О.А., Суханов В.Г.
(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The paper considers adaptation processes as internal characteristic properties. It is proposed to establish a connection between the manifestations of adaptation effects and the dynamics of development and interaction of active elements.*

***Key words:** adaptation, self-organization, active elements.*

Так історично склалося, що всі матеріальні об'єкти ідентифікуються і вивчаються шляхом оцінки їх властивостей. В загальному випадку під властивостями розуміється така сторона предметів, яка обумовлює їх схожість або відмінність з іншими предметами. При цьому властивості як такі виникають та проявляються при взаємодії предметів один з одним. Це означає, що властивості існують самі по собі і непритаманні об'єктам. Саме таке розуміння властивостей заклало в свій час підвалини діючих парадигм. Укорінення ідей та методів системного підходу базується на індивідуалізації об'єкту через унікальність його структурного оформлення, що означає для кожного об'єкта притаманність набору певних властивостей саме цьому об'єкту. Їх існування не залежить від того, взаємодіють їх носії з іншими об'єктами чи ні. Властивості такого типу належать до таких, які внутрішньо притаманні саме цим об'єктам. Таким чином, сукупність всіх властивостей можна дихотомічно поділити на два класи – на автономні властивості, які не належать об'єктам (феноменальні), та на властивості, які внутрішньо належать об'єктам (ноуменальні). Якщо перелік феноменальних властивостей і методики їх кількісної оцінки відомі, то інформації, що стосується властивостей, які складають внутрішню сутність будь-яких об'єктів, недостатньо. Тому, на нашу думку, настав час з'ясувати, що виступає в якості характерних ознак індивідуальних об'єктів, та яким чином і за допомогою яких механізмів забезпечується їх тривале існування в умовах несприятливої дії довкілля.

Проведений аналіз дозволив дійти до тривіального висновку – незважаючи на принципову несхожість будь-яких об'єктів між собою їм

притаманна загальна ознака - структура. Відсутність узагальнюючого визначення поняття структура не є перешкодою для виявлення характерних елементів, які здатні формувати внутрішню архітектуру об'єктів. Всю сукупність елементів на різних рівнях неоднорідностей можна розділити на консервативні, метастабільні та активні за швидкістю їх реакції на зовнішні або внутрішні подразники. Відповідно до характеру впливу відбувається перманентна зміна внутрішньої архітектури, що призводить до розвитку певної динаміки існування об'єкту. Тому структура як така в умовах неперервних змін не може зберігати своє домінуюче положення. Більш актуальна роль належить процесам структуроутворення. Базова відмінність понять структура та структуроутворення полягає в тому, що структура відображає миттєвий стан об'єкту, а структуроутворення характеризує динаміку неперервного процесу змін структури. Непомітні та невідчутні процеси та явища структуроутворення складають основу повсякчасного існування всіх об'єктів, включаючи об'єкти будівельного призначення. Їх цілісність, незворушність та незмінність базуються на неперервних динамічних процесах структуроутворення. Саме динамічні процеси повсякчас спонукають об'єкти пристосовуватися до інших ситуацій. При цьому в цих процесах вибірково приймають участь активні елементи структури, до яких належать внутрішні поверхні розділу, тріщини, а також локальні та інтегральні залишкові (початкові, технологічні, генетичні) деформації. Не виключені ситуації, при яких змінюються параметри елементів, їх взаємотрансформація на фоні зміни розподілу залишкових деформацій, що викликає зміну взаємовідносин та взаємовпливу елементів. Відбувається пристосування трансформованих елементів один до одного, до свого оточення та до зміни деформованого стану – реалізуються своєрідні процеси адаптації. Таким чином, зміна параметрів одних елементів провокує певну реакцію інших, що забезпечує невгамовність процесів структуроутворення – своєрідних явищ адаптації як здатності системи розвиватися за принципом “від досягнутого” таким чином, щоб через адаптаційне переутворення залишатись самою собою.

Можна стверджувати, що характерною ознакою, що індивідуалізує об'єкти, є наявний індивідуальний набір елементів структури, взаємодія між якими забезпечує постійність процесів структуроутворення, які, в свою чергу, дозволять реалізуватися внутрішнім властивостям – адаптації як перманентного пристосування до внутрішніх змін та до зовнішніх умов. В загальному випадку під терміном адаптація (лат. *adapto* – пристосовую) розуміють орган, властивість чи функцію, а також процес пристосування до мінливих умов зовнішнього середовища.

Багатоваріантність визначень одного поняття означає його інформаційну насиченість та неготовність до узагальнення. Виходячи з необмеженого змістового навантаження адаптацію можна розглядати у вигляді постійно присутньої нематеріальної складової матеріальних об'єктів. Саме вона визначає внутрішню сутність об'єктів і одночасно виступає в якості внутрішніх властивостей, процесах, що протікають на різних рівнях неоднорідностей в різних темпоритах, а також в якості мети структурних трансформацій. Як вже відмічалось, структурні трансформації реалізуються шляхом невчасності активних елементів, які є знаними майстрами створювати ситуації нестабільності і подальшого розвитку. Динаміка активних елементів наповнює чергові події новим сенсом та змістом.

Активні елементи є продуктом багатоосередкового структуроутворення, під яким розуміється самовільний процес формування структуроутворюючих центрів, що призводить до появи принципово нових елементів-несущільностей у вигляді поверхонь розділу. Нові елементи відрізняються від решти, але створюють з ними передумови подальшого розвитку і прояву ефектів внутрішньої адаптації. Внутрішні поверхні розділу трансформуються в інші несущільності – пори, капіляри, тріщини, які визначають весь комплекс фізико-механічних властивостей матеріалу і виробів із них, що автоматично включає в роботу процеси адаптації при зміні умов експлуатації.

Процеси адаптації неможливі без участі активних елементів. Прояв адаптивних властивостей слід розглядати як своєрідну реакцію активних елементів на дію зовнішніх та внутрішніх факторів. Адаптація повсякчас супроводжує еволюційно-революційний процес, спрямований на досягнення динамічної рівноваги, що дозволяє зберігати об'єкт-систему в функціональному стані. Незворотність прояву ефектів адаптації через саморозвиток активних елементів порушує симетрію розвитку системи, що призводить до розриву ланцюжка "початковий склад-властивості". З кожним етапом структуроутворення структурні зміни повторюючись не повторюються, провокуючи зростання різноманітності структури і розширюючи тим самим можливість адаптації. Взаємозв'язок активних елементів з проявом ефектів адаптації дає можливість розглядати адаптацію і як процес, і як результат процесу.

Проведений аналіз показав, що для забезпечення тривалого існування існуючих об'єктів-систем в їх структурі повинні співіснувати активні елементи, динаміка яких здатна провокувати прояв адаптаційних можливостей.

**ЕКОЛОГО-ФЕНОМЕНОЛОГІЧНІ ТА МАТЕМАТИЧНІ
ПІДХОДИ ПО КОНДИЦІОНУВАННЮ УПАРЕНИХ
РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ**

¹Гузій С.Г., ²Присяжна О.В., ³Гузій О.І.

(¹ДУ Інститут геохімії навколишнього середовища НАНУ,

²Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАНУ,

³Національний університет будівництва та архітектури, м. Київ)

***Abstract.** The environmental and phenomenological approaches and mathematical modelling allowed us to determine the effective methods of conditioning of evaporated radioactive waste in aluminosilicate matrices when they they filled with compounds of refractory materials. Because of the study, the region of the component composition of the compounds corresponding to the maximum values of the initial parameters ρ and $R_{cm} \rightarrow \max$ was determined. The region we bounded along the x_1 axis by the WNi content from 2.8 to 6.8%, along the x_2 axis by the $MoSi_2$ content from 6.25 to 12.75%, and along the x_3 axis by the B_4C content from 1.8 to 2.8%. The compounds in this area are characterized by an average density of 1.98 to 2.02 g/cm³, a compressive strength of 35 to 40 MPa, a weakening factor of 78 to 78.5% and a linear weakening factor of 0.46 to 0.47 cm⁻¹. The density and linear attenuation coefficient we most significantly affected by the WNi content, the gamma attenuation by the $MoSi_2$ content, and the strength of the composites by the B_4C content.*

***Keywords:** aluminosilicate matrix, conditioning, environmental safety, compounds, gamma attenuation, mathematical planning, radioactive waste refractory additives.*

Очищення радіоактивних вод низької та середньої активності, утилізація продуктів сорбції з подальшим зберіганням та збереженням є актуальною екологічною задачею. Вирішення цієї задачі принесе користь довкіллю та збереже здоров'я людей і забезпечить чистоту екосистем.

Феноменологічність підходів полягає в усвідомленні основних проблем, котрі виникають при поводженні з радіоактивними відходами

(рис. 1). Згідно даних МАГАТЕ слід вагомо звернути увагу на вибір довговічної матриці для кондиціонування РВ, способу упарення та розміщення іммобілізованих РВ в контейнері, а також вибору допоміжних заходів, попереджуючих перегрів внутрішнього простору контейнерів від радіолізу.



Рис. 1. Основні стадії поводження з радіоактивними відходами (МАГАТЕ)

До математичних методів слід віднести ядерно-фізичні розрахунки умов виникнення радіолізу з моделюванням цих процесів в умовах реального часу. Окрім цього, слід звернути увагу на оптимізацію складів самої матриці, та матриці з добавками, що запобігають як гамма послабленню та і термоізоляції внутрішніх поверхонь контейнерів,

Метою досліджень, що будуть представлені в даній роботі, є визначення впливу добавок тугоплавких матеріалів на фізико-механічні та гамма послаблюючі властивості компаундів на основі алюмосилікатної матриці морденітового складу.

В якості об'єкту досліджень обрано алюмосилікатну матрицю виду $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8\text{SiO}_2 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$ [1]. Властивості зразків матриці наступні: $\rho=1,86 \text{ г/см}^3$; $R_{\text{cm}}^{1000\text{C}}= 28,69 \text{ МПа}$; $\alpha_v= 1,2\%$; $\text{с}\gamma= 29,8\%$; $\mu_m= 0,054 \text{ см}^{-1}$. У якості тугоплавких металічних і неметалічних матеріалів [2-5] обрано сплав вольфраму з нікелем (ВН-5), MoSi_2 , V_4C і BaSO_4 . Вибір добавок базувався на застосуванні матеріалів з більшою атомною масою і густиною. Суттєве значення мали їх теплопровідність, клтр і температуростійкість. Властивості тугоплавких матеріалів наступні:

WNi – $\rho=18 \text{ г/см}^3$, $\alpha_t= 6...14 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $\lambda=5 \cdot (14-19) \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $T_{\text{пл}}=3000^\circ\text{С}$.
 MoSi₂ - $\rho=5,5 \text{ г/см}^3$; $\alpha_t=4\%$; $T_{\text{пл}}=2030^\circ\text{С}$. В₄С - $\rho=2,52 \text{ г/см}^3$; $\alpha_t=4,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$; $\lambda=62,8 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$; $T_{\text{пл}}=2360^\circ\text{С}$. BaSO₄ - $\rho=4,5 \text{ г/см}^3$; $T_{\text{пл}}=1500^\circ\text{С}$. WNi має сильну здатність до екранування гамма випромінювання; MoSi₂ характеризується високою температуростійкістю; В₄С має високу здатність до поглинання теплових нейтронів. BaSO₄ характеризується здатністю до розсіювання гама променів. Сульфат барію вводили в склад алюмосилікату в кількості 5%. Високі температури плавлення тугоплавких добавок значно перевищують температуру радіолізу, яка становить 900-1200°C, а їх використання є одним із нових напрямків по гамма послабленню в радіаційному матеріалознавстві.

Оптимізацію виконували з використанням трифакторного симплексного центрального плану експерименту в математичному середовищі STATISTICA 12 з реалізацією спеціальної кубічної моделі, що враховує не лінійність впливу факторів на властивості вихідних параметрів.

Фактори варіації та матриця для планування експерименту наведені в табл. 1 і табл.2.

Таблиця 1. Інтервали варіювання і значення змінних факторів

Фактори, вигляд	Натуральний	Кодований	Рівні варіювання		Інтервал варіювання
			0	1	
WNi	%	X1	2,5	7,5	5
MoSi ₂	%	X2	5	15	10
В ₄ С	%	X3	1,5	3,5	2

Таблиця 2. Матриця планування експерименту

Точки плану	План матриці в кодах			Матричний план у повному розмірі		
	X1	X2	X3	WNi, %	MoSi ₂ , %	В ₄ С, %
1	0,00	1,00	0,00	2,5	15	1,5
2	0,33	0,33	0,33	4,17	8,33	2,17
3	1,00	0,00	0,00	7,5	5	1,5
4	0,50	0,50	0,00	5	10	1,5
5	0,00	0,00	1,00	2,5	5	3,5
6	0,50	0,00	0,50	5	5	2,5
7	0,00	0,00	0,50	2,5	10	2,5

У якості основних вихідних параметрів обрані густина та міцність на стиск, що задовольняють вихідним критеріям: $\rho \rightarrow \max$, $R_{\text{см}} \rightarrow >4,9$

МПа [6]. Зразки компаундів розмірами 3х3х3 см випробували згідно діючих НТД [7]. Реалізація плану експерименту наведена в табл. 3.

Таблиця 3. Фізико-механічні та поглинально-послаблюючі властивості компаундів

Точки плану	ρ , г/см ³	Rcm, МПа	C _γ , %	μ , см ⁻¹
1	1,92	26,76	78,9	0,44
2	2,02	30,21	77,6	0,47
3	2,01	28,44	77,9	0,46
4	1,96	26,32	78,8	0,45
5	1,93	28,3	76,6	0,45
6	1,95	31,71	76	0,46
7	1,88	40,0	77,6	0,45

Висновки. В результаті дослідження визначено область компонентного складу компаундів, що відповідає максимальним значенням вихідних параметрів ρ і Rcm \rightarrow max. Область обмежена по осі X1 вмістом WNi від 2,8 до 6,8%, по осі X2 вмістом MoSi₂ від 6,25 до 12,75%, по осі X3 вмістом В₄С від 1,8 до 2,8%. Компаунди в даній області характеризуються значеннями середньої густини від 1,98 до 2,02 г/см³, міцності при стиску від 35 до 40 МПа, коефіцієнтом послаблення від 78 до 78,5% і лінійним коефіцієнтом послаблення від 0,46 до 0,47 см⁻¹. На показники густини та лінійний коефіцієнт ослаблення найбільш вагомо впливає вміст WNi, на показники гамма ослаблення вміст MoSi₂ і на міцність компаундів - вміст В₄С.

Робота виконана в рамках проекту: The EURAD-2 project has been co-funded by the European Union under Grant Agreement No 101166718.

1. Guzii S., Zlobenko B. Application of alkali activated cements for immobilization of dry low-level radioactive waste containing copper ferrocyanide. Technology transfer: fundamental principles and innovative technical solutions, 2023, 3-8.

2. Hanes T. V., Alexander M. N. Nuclear magnetic resonance study of β -rhomboedral boron and boron carbide. J. Chem, Phys., 54, 12, 1971, 5296-5310.

3. Кислый П. С., Кузенкова М. А., Боднарук Н. И., Грабчук Б. Л. Карбид бора. К. Наукова думка, 1988. 216с.

4. Patnaik P. Handbook of Inorganic Chemicals. - McGraw-Hill, 2003. 1086p.

5. Рипан Р., Четяну И. Неорганическая химия. Химия металлов. М.: Мир, 1972. Т. 2. 871с.

6. GOST 29114-91. Radioactive waste. Method for measuring the chemical stability of solidified radioactive waste by long-term leaching.

7. Nesmeyanov, A.N. Radiochemistry. Chemistry Publishing House, Moscow, (1972), 592.

СТРУКТУРОУТВОРЮЮЧА РОЛЬ ФІБРИ В ОРГАНІЗАЦІЇ МІКРОСТРУКТУРИ ДЕКОРАТИВНИХ КОМПОЗИТИВ

Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The article proposes to use multi-level reinforcement of the structure of cement composites to improve and preserve the functional properties of decorative products. Strengthening the structure of the composite at all levels of its heterogeneities will provide the necessary resistance to various loads.*

***Keywords:** decorative composite, structure, fiber, dispersed system, cluster, experimental-statistical model*

Вступ. Одним із важливих завдань при створенні вискоєфективних декоративних композитів є детальне вивчення їх структури. Загальновізвано, що в досягненні оптимальної структури бетону істотну роль відіграють кластерні (або агреговані, блокові) структури цементного каменю. Це обумовлено тим, що агреговані структури дисперсної матриці, через багатоманітність складу й будови, володіють різними рівнями властивостей і сил адгезійно-когезійних взаємозв'язків та формують різні величини градієнтів напружень в об'ємі будівельного композиту. Об'ємні деформації, що сформувалися під впливом фізико-хімічних процесів гідратації цементу та – виникають під дією кліматичних навантажень, є головною причиною утворення несущільностей (пор, капілярів, тріщин тощо) в структурі матеріалу виробів [1]. Водночас залежно від напружено-деформованого стану структури композиту параметри несущільностей динамічно змінюються в часі. Тож для поліпшення стійкості міжкластерних поверхонь розділу до дії напружень і розвитку деформацій, до складу структурних блоків композиту фахівцями рекомендується вводити фібру різної природи і геометрії. Лінійні частки, як самостійні та рівноправні елементи, здатні приймати участь в процесах структуроутворення матеріалу [2-3]. Однак ефективність будь-яких дискретних волокон першочергово залежить від ступеня їх розподілення (диспергування) в об'ємі матеріалу. Недостатнє диспергування фібри призводить до виникнення структурних дефектів у виді «фібрових грудкувань» та не забезпечує

сприятливе розподілення несучильностей. Проведений огляд джерел показав, що розподіл волокон в композиті можна покращити за рахунок зменшення їх довжини, використання органо-мінеральних добавок тощо.

Методика та матеріали досліджень. Для всебічного вивчення впливу фібри на процес організації структури декоративних композитів експериментальні дослідження проводилися в декілька етапів, на різних фізичних моделях різних дисперсних систем [2-3].

На першому етапі для відтворення процесу організації структурних агрегатів на мікрорівні композиту використовувалися моделі фізичної взаємодії часток дисперсної фази на поверхні моделі дисперсійного середовища. В дослідженні було прийнято десять різних видів фізичних моделей: моделі дисперсних зерен або часток різної природи, моделі дисперсних і лінійних часток. Для кількісного аналізу, через пройдений шлях кожної частки, обчислювалась середня швидкість утворення кластерів (v , мм/хв).

На другому етапі для оцінки ступеня дисперсності дискретних волокон та аналізу кінетики утворення кластерних підструктур мікроструктури армованих композитів застосовувалися фізичні моделі глиняних і полімерних в'язучих. Дослідження модельних систем проводилися на зразках-дисках розміром 100×10 мм ($\varnothing \times h$).

Для вивчення процесу структуроутворення виготовлялись сім різних за складом глиняно-водних композицій серед яких: один склад – неармований; шість – армовані фіброю однієї довжини 3, 6 і 12 мм та в різній комбінації двох фібр. Фіксованими складовими в експерименті були водо-глиняне співвідношення, дискретна арматура вводились від маси глиняної суміші в загальній кількості 0.06 %. Під час досліджень об'ємна маса, відносна усадка, коефіцієнт пошкодженості та коефіцієнт чутливості до висихання систем визначались у віці зразків 7 днів.

Для наочного підтвердження участі дискретних волокон в процесах структуроутворення виготовлялись різні за складом епоксидні композиції: базова без фібри та гібридно-армована фіброю довжиною 3 і 12 мм, в кількості 0.06 % від загальної маси композиції.

На третьому етапі для точного опису мікроструктури декоративного композиту та розгляду взаємозв'язків між вихідними його параметрами застосовано метод експериментально-статистичного моделювання [4]. Аналіз інформації, накопиченої під час реалізації експериментів на двох попередніх етапах, дозволив визначити список основних діючих факторів складу матриці та межі їх варіювання.

Експеримент проведено по 25-ми точковому 4-ох факторному плану. Зважаючи на різний характер впливу рецептурних складових на структуроутворення цементного каменю фактори об'єднано в дві групи:

«Модифікатори цементної системи» і «Параметри дискретного армування». В першу групу входили дозування тонко дисперсного цеоліту (Z) і суперпластифікуючої добавки (MF) на рівнях: $Z \rightarrow 0, 4, 8$ % (вводився взамін частини цементу) та $MF \rightarrow 0.15, 0.3, 0.45$ % (від маси цементу). В другу – скляних волокон довжиною 3 і 12 мм ($F3$ і $F12$) на рівнях $F3 = F12 \rightarrow 0, 0.015, 0.03$ % (вводились від маси композиції).

Склади цементного тіста виготовлялись з різним водо-цементним співвідношенням (V/C), при якому забезпечувалась однакова консистенція композицій за розпливанням конуса. Для дослідження середньої густини, водопоглинання, коефіцієнту пошкодженості цементного каменю за планом експерименту виготовлялись зразки-диски розміром 100×10 мм ($\varnothing \times h$). Зразки випробовувались у віці 28 діб.

Результати досліджень. Експериментальні спостереження (*1-й етап досліджень*) за перебігом міжчасткових взаємодій продемонстрували, що в первинно неупорядкованих дисперсних системах, залежно від природи та геометрії часток дисперсної фази і відстані між ними за однаковий відтинок часу, утворюється різна кількість структурних агрегатів, відмінних за кількістю часток і розмірами. Причому дисперсні й лінійні частки на поверхні дисперсійного середовища рухаються із різною швидкістю і по різним траєкторіям, складних за видом, змінюючи своє положення та величину кута початкового просторового орієнтування. Залежно від співвідношення лінійних часток і дисперсних зерен утворюються кластерні підструктури різної природи, які відрізняються періодами свого формування. На нашу думку, саме різноманітність таких підструктур на мікрорівні бетону повинна дозволити поліпшити структурні параметри в'язучій системі.

Для підтвердження заключення, виконано аналіз результатів досліджень глиняних і полімерних композицій (*2-й етап дослідження*). Отримані результати на моделях глини дозволили переконатися, що дискретні моноволокна здатні активно брати участь в організації структурних агрегатів. Аналіз властивостей різних складів глиняної композиції довів, що різноманітність кластерних підструктур надає можливість поліпшити структурні параметри в'язучій системі. Використання фібри оптимальної геометрії в глиняних композиціях забезпечує отримання структур зі значно меншою кількістю дефектів (підтверджується коефіцієнтом пошкодженості, величиною усадки тощо). З огляду на отримані результати можна вважати, що характер розподілу деформацій в структурі матеріалу є різним. Для підтвердження спроможності лінійних часток до сприйняття і перерозподілу деформацій, на прикладі фізичних моделей полімеру розглянуто розподіл залишкових технологічних напружень. Візуальний

аналіз картин смуг моделей продемонстрував, що неармований склад порівняно з армованим характеризується дещо більшим градієнтом нерівномірності полів напружень в об'ємі композиту. Наявність фібри однозначно змінює характер розподілу об'ємних деформацій, що виникають при твердінні зв'язуючого. Зважаючи на отримані результати дисперсних систем, було розпочато нові дослідження, а саме цементної матриці декоративного бетону (3-й етап дослідження).

Обробка експериментальних даних показала, що величина В/Ц помітно позначається на фізичних параметрах цементних систем: чим вище початкове В/Ц, тим більша капілярна пористість і тим менш щільною є область межі розділу між структурними агрегатами. Зі зростанням В/Ц збільшується кількість несущальностей у виді відкритих пор, капілярів тощо в об'ємі каменю та відповідно підвищується його водопоглинання. В роботі розглянута співзалежність між структурними параметрами. Між властивостями різних в'язучих систем виявлено суттєвий кореляційний зв'язок. За результатами отриманими при дослідженні водопоглинання W і коефіцієнту пошкодженості K_D побудовані структуровані експериментально-статистичні моделі «повного» поля [4-5]. З метою аналізу впливу окремо кожної групи факторів на формування структурних параметрів цементних систем проведено ряд обчислювальних експериментів. Для їх реалізації з базових ЕС-моделей критеріїв отримувались 2-х факторні моделі, які дозволили оцінити вплив кожної групи факторів. Результати аналізу моделей підтверджують, що дискретні волокна є активними учасниками фізико-механічних процесів структуроутворення каменю. Присутність фібри в складі композитів змінює будову капілярно-пористого простору. Склади армованого цементного композиту характеризуються меншими величинами K_D та W у порівнянні з неармованим складом.

1. Вировой В.М., Коробко О.О., Суханова С.С., Суханов В.Г. Наукові дослідження: основи методології. Одеса: ОДАБА, 2024. 148с.

2. Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М., Макарова С.С. Роль дискретної арматури в організації мікроструктури декоративних композитів. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2024. – прийнята редколегією до друку.

3. Довгань О.Д., Вировой В.М., Ляшенко Т.В., Довгань П.М. Особливості організації мікроструктури декоративних композитів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 2024. – прийнята редколегією до друку.

4. Вознесенский В., Ляшенко Т. ЭС-модели в компьютерном материаловедении. *Материалы к 45-му международному семинару по моделированию и оптимизации композитов*. Одесса: «Астропринт», 2006. 115с.

5. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Колесников А.В., Вировий В.М., Семенова С.В.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** A simplified dynamic model of composite structure formation is considered, taking into account interrelated changes in the number, tension, and cooperativity of its interparticle bonds.*

***Keywords:** structure formation, building composites, bonds, cooperativity, bypassing the activation barrier.*

Структурування є ключовим процесом, що визначає фізико-механічні властивості будівельних композитів. Головною рисою процесу структурування є породження та трансформація нових активних елементів структури (тріщин та внутрішніх границь розділу), що визначають поведінку інших елементів структури матеріалу. При граничному спрощенні складного процесу структурування його можна звести до динаміки міжелементних зв'язків. Здатність матеріалу утворювати стабільні зв'язки між складовими частками безпосередньо впливає на його міцність, стійкість до руйнування та довговічність.

У роботі запропоновано спрощену модель структурування, яка враховує взаємопов'язану зміну у часі трьох параметрів композиційного матеріалу – показників густини зв'язків $x(t)$, їх кооперативності $y(t)$ та напруженості $z(t)$. Модель дозволяє дати якісну інтерпретацію таким явищам, як мимовільне формування структури будівельного матеріалу під час тужавлення, вторинне зниження міцності при тужавленні деяких матеріалів (на основі гашеного вапна та, частково, гіпсу), явищу формування цілісної структури при стисканні певних органічних та неорганічних силікатних матеріалів (феномени клеювання та солідофікації при стисканні), руйнуванню виробу з композиту.

Параметр густини зв'язків $x(t)$ описує кількість активних контактів між частинками композиту, що утворюють мережу зв'язків у матеріалі. Доцільно використати відносну густину зв'язків, орієнтовно критичної кількості зв'язків у перколяційному кластері гексагональної щільної

упаковки (*HCP*, координаційне число $Z=12$, число зв'язків на N вузлів $L_{\max} = 3N$). Показник густини зв'язків $x = (L - 0.5L_{\max}) / 0.5L_{\max}$. Величина $0.5L_{\max}$ ($1,5N$) приблизно відповідає критичному (перколяційному) значенню для неплотних пакувань, таких, як об'ємноцентроване кубічне (*BCC*, $L_c \approx 1,6$) або просте кубічне (*SC*, $L_c \approx 1,35$). На мікроскопічному рівні цей показник може відповідати контактам різної природи (коагуляційним, фазовим, адгезійним) між кристалічними або аморфними утвореннями, між частинками наповнювача і матричного матеріалу, які формують цілісну структуру матеріалу та надають йому жорсткості та міцності. **Фактор кооперативності** (y) відповідає ступені кооперативності з протилежним знаком. Цей параметр характеризує колективну поведінку зв'язків і їх здатність до спільного утворення стабільної структури. Кооперативність є ключовим фактором, що визначає здатність матеріалу як системи і структури існувати в альтернативних стабільних станах з великою і малою густиною зв'язків (в останньому варіанті, можливо, з втратою цілісності). Цей фактор визначає також висоту активаційного бар'єру між станами. При низькому рівні кооперативності зв'язків в матеріалі створюється тенденція до формування відносно розрідженої структури з середнім числом зв'язків. *Напруженість зв'язків* z . Цей параметр (непрямо) відображає усереднене зусилля, породжене відхиленням довжини зв'язків від її стандартної величини. Параметр напруженості зв'язків можна виразити як $z = \langle k(l - l_0) / l_0 \rangle$, де усереднення проводиться по всіх зв'язках масштабного рівня, на якому досліджується процес трансформації матеріалу.

Для якісного відображення основних процесів структуроутворення для зміни числа зв'язків достатньо прийняти рівняння, права частина якого відображається кубічним поліномом (1) і, відповідно, катастрофою збірки (рис.1):

$$\varepsilon x' = -(x^3 + ux + z), \quad (1)$$

де $\varepsilon \rightarrow 0$ – малий параметр, що характеризує «швидкі» процеси зміни густини зв'язків під час процесів перебудови матеріалу (наприклад, під час процесів руйнування).

Такі зміни відбуваються, насамперед, для системи зв'язків активних елементів в складі структури матеріалу. Поблизу поверхні катастрофи збірки швидкість наближення до неї (знак “–“ в правій частині) мінімальна за виключенням точок з вертикальною дотичною, де відбуваються швидкі стрибкоподібні переходи між верхньою та нижньою частиною збірки (при негативному значенні y). Такі переходи відповідають об'ємному руйнуванню матеріалу (рис.1,1), або

утворенню структури при дії на матеріал зовнішнього стискання (рис. 1,2). Утворення структури при стисканні спостерігається при явищі солідофікації (спресовування) або при склеюванні.

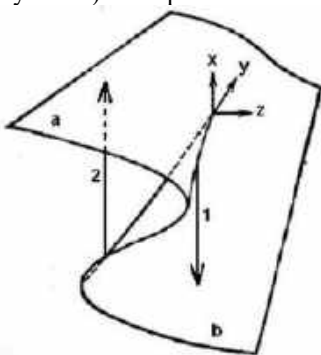


Рис. 1. Катастрофа збірки, в прийнятих модельних координатах. а – плотна структура (велика густина зв'язків), б – рихла або незв'язана структура, 1 – процес розриву зв'язків (руйнування), 2 – процес створення суцільної структури при стиску (солідофікація, склеювання).

Важливою проблемою теорії структуроутворення в'язучих та композитів на їх основі є наявність активаційного бар'єра і, одночасно, необхідність переходу системи до стабільного стану з достатньою густиною зв'язків між частинками. В моделі, що розглядається, введення третьої координати – **параметра кооперативності** – дозволяє обійти активаційні бар'єри (не долаючи його, мимовільно) через зміну характеру синергічної взаємодії зв'язків та внутрішніх напружень (рис.2).

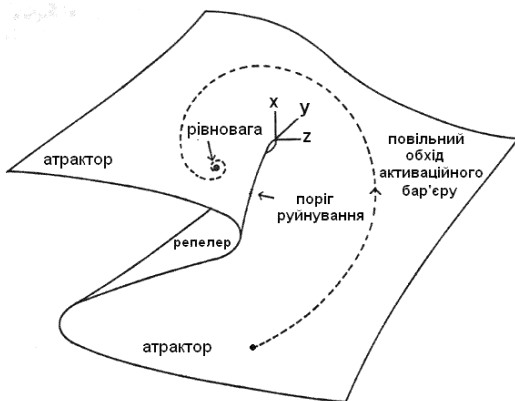


Рис. 2. Гвинтова траєкторія обходу активаційного бар'єру

Це може бути основою для побудови динамічної моделі структуроутворення, яка включає як плавні зміни, які моделюють процеси тужавлення, так і різкі переходи, що моделюють процес руйнування композиту. Згідно запропонованому підходу, структуроутворення композитів на основі мінеральних в'язучих супроводжується одночасною повільною зміною як параметру кооперативності y , так і рівня внутрішніх напружень z , що необхідно для обходу активаційного бар'єру і точки біфуркації. Для зміни цих параметрів запропонована лінійна модель (2, 3):

$$y' = -\alpha y - \beta x, \quad (2)$$

$$z' = -\gamma z - \delta x + G \quad (3)$$

У лінійних коефіцієнтів (2, 3) є концептуальне тлумачення. Коефіцієнт α (зменшення кооперативності). Цей коефіцієнт відповідає за швидкість зниження кооперативності, коли матеріал знаходиться на початковій фазі тужавлення. Значення α повинен бути помірним, щоб надати системі достатньо часу, щоб пройти через область з низькою кооперативністю, наприклад $\alpha=0,5$. Коефіцієнт β відповідає зниженню кооперативності на початку тужавлення (від'ємні x) та підвищенню кооперативності зі збільшенням кількості зв'язків (позитивні x). Він повинен бути досить високим, щоб кооперативність швидко зростала зі збільшенням кількості зв'язків. Це забезпечить повернення до високостабільної фази після завершення терміну тужавлення. Приклад: $\beta=2,0$. Коефіцієнт γ описує мимовільне зменшення напруження зв'язків – релаксацію. Напруження повинна зменшуватися з помірною швидкістю, що відображає повільний перехід до зв'язаної структури. Приклад: $\gamma=0,3$. Коефіцієнт δ відображає початкове збільшення напруження зі збільшенням кількості зв'язків (коли x негативне), і зменшення напруження при позитивних x . Зменшенню напруження відповідає утворення організованої ущільненої структури.

Наприклад при $\delta=1,5$. Параметр $G < 0$, що може описувати релаксацію напруженості системи. Негативне значення G відбиває тенденцію до зменшення напруженості навіть за наявності зовнішніх впливів. Це може бути пов'язано з релаксацією внутрішньої напруженості, яка накопичувалася в матеріалі, під час тужавлення. Приклад: $G=-1$.

Для типової системи (4) можна показати, що існує єдиний стан рівноваги – асимптотично стійкий фокус на верхній частині збірки, до якого за гвинтовою траєкторією наближаються фазові траєкторії, що якісно відтворює процес структуроутворення – мимовільного переходу до стану з великою густиною зв'язків.

$$\begin{aligned} \varepsilon x' &= -(x^3 + yx + z) \\ y' &= -2y - 2x \\ z' &= -2z - 1 \end{aligned} \quad (4)$$

Основні риси фазового портрету (4) відображено на рис.3.

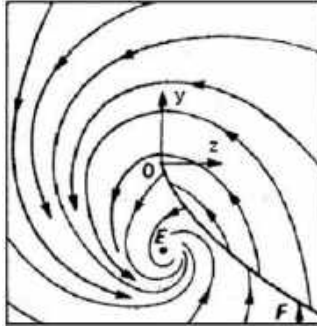


Рис.3. Основні риси фазового портрету досліджуваної системи

Окрім мимовільного структуроутворення, формування цілісної структури виробу під тиском та об'ємного руйнування, своє тлумачення знаходить вторинне падіння міцності, що спостерігається в випадку ряду матеріалів, зокрема вапнякових (з найбільшою ймовірністю) та гіпсових, і композитах на їх основі. Спіралеподібні траєкторії, що відповідають процесам структуроутворення, можуть наближатися до стійкого фокусу на верхній частині збірки, не доходячи до порогового значення напружень (при яких реалізується скачкоподібне зниження числа зв'язків згідно з рівнянням 1), що пов'язане з безперервним збільшенням густини зв'язків. В той же час, при відповідних початкових умовах і значеннях параметрів рівнянь (2,3) спіралеподібні траєкторії можуть переходити на нижню частину поверхні збірки (мала густина зв'язків), що відповідає вторинній втраті міцності. Таким чином, здатність до відповідного перетворення залежить від швидкості релаксації напружень та стабілізації рівня кооперативності зв'язків в матеріалі, а також наявності початкової структури, що відображають відповідні коефіцієнти моделі.

Слід зазначити, що здатність матеріалу до формування різних структур входить в модель, що розглядається, через її параметри та початкові умови моделі. Спрошеність процесів, що розглядаються у моделі є необхідною «ціною» її універсальності – придатності до застосування до різних матеріалів, при адекватному виборі параметрів.

ПРИХОВАНА ІНФОРМАЦІЯ ФРАКТАЛЬНИХ СТРУКТУР БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Мартинов В.І., Тайчан Д.С., Макарова С.С., Гаврищук Г.В.
(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The given results of experimental studies confirm the effectiveness of the proposed approach, which allows us to explain the different influence of the water-cement ratio on the change in the strength of materials of dense and porous structures.*

***Keywords:** Information, fractal, structure, building materials, internal interfaces.*

У ХХ столітті термін «інформація» набув особливого значення. Інформація (інформатизація, комп'ютеризація, пояснення, оповідь) — це абстрактне поняття з численними значеннями, залежними від контексту. У широкому сенсі це будь-яке знання, а у вузькому — це результати збору даних (повідомлення, відомості) незалежно від форми їх подання. Інформація визначає природу об'єктів і явищ у просторі та часі. Тому об'єкт дослідження містить певну інформацію, але не може передати її безпосередньо.

Один із способів, яким дослідник може отримати цю інформацію, — це аналіз структури матеріалу. Для цього спершу потрібно визначити поняття «структура». Візьмемо, наприклад, «цементний камінь», що є основою для різних типів бетону. Процес гідратації цементу супроводжується зменшенням загального об'єму системи. У результаті цементний камінь формує широку мережу внутрішніх поверхонь розділу (ВІП).

Внутрішні поверхні розділу (ВІП) знаходяться між окремими блоками (елементами) твердої фази, що дозволяє розглядати структуру цементного каменю як сукупність взаємопов'язаних елементів, які утворюють єдине ціле. У такій інтерпретації структура цементного каменю відповідає всім ознакам «системи». Окремі блоки твердої фази є елементами цієї структури, а ВІП виконують функцію зв'язків між елементами, забезпечуючи цілісність об'єкта, що є основною властивістю системи. Таким чином, поняття «структура» і «система»

стають тотожними. Це також створює можливості застосування загальносистемних закономірностей до досліджуваного об'єкта, що дозволяє пов'язати його властивості з якісними та кількісними характеристиками зв'язків, тобто ВПР. Інакше кажучи, що більша загальна протяжність внутрішніх поверхонь розділу, то вища міцність матеріалу.

ВПР у цементному камені утворюють різноманітні візерунки або патерни. З позицій фізики ця структура представляє собою перколяційний кластер. Це дає підстави вважати, що кожна структура має унікальні патерни. Можна також припустити, що ці патерни є носіями певної інформації. Однак постає питання, як саме розшифрувати цю інформацію. Завдання ускладнюється тим, що через «нерівності» форми неможливо описати ці патерни в термінах класичної геометрії та математики. Для цього потрібен певний «перекладач».

Першим, хто звернув увагу на відсутність у природі прямих ліній і «правильних» геометричних форм, був Бенуа Мандельброт. Він розробив фрактальну геометрію та ввів термін «фрактал» (від лат. "дрібний"). Для кількісного визначення ступеня «зламаності» ліній (відхилення від прямолінійності) та шорсткості поверхонь Мандельброт запропонував застосовувати дробову розмірність (так звану розмірність Хаусдорфа-Бізікевича).

Таким чином, якщо структура цементного каменю у вигляді патернів із внутрішніх поверхонь розділу є носієм інформації, яку можна трактувати з позицій фрактальної геометрії, виникає логічна триада «структура-фрактальність-інформація». Загалом під триадою мають на увазі єдність, що утворюється трьома окремими членами/частинами. Існує безліч триад, наприклад, триада Гегеля - це об'єднання будь-яких двох протилежних понять і якогось третього поняття, яке опосередковує (тобто виражає) внутрішню єдність двох протилежних понять. У нашому випадку «структура» та «інформація» не можуть розглядатись як прямі протилежності. У той же час, виходячи з визначень цих понять, важко знайти і ознаки, що їх об'єднують. Введене третє поняття «фрактальність» якраз і є тим елементом триади, що дозволяє виразити внутрішню єдність перших двох.

На кафедрі виробництва будівельних виробів та конструкцій Одеської державної академії будівництва та архітектури розроблено комп'ютерні програми щодо визначення фрактальної розмірності структури будівельних композитів.

У попередніх дослідженнях було виявлено, що міцність матеріалів з макропористою структурою (ніздрюваті бетони) не має прямої пропорційної залежності від міцності складової розчину, що формує

каркас. Водночас міцність щільних будівельних композитів на основі мінеральних в'язучих речовин прямо пропорційна водоцементному відношенню.

Для дослідження процесу структуроутворення матеріалів щільної та пористої структури був проведений експеримент, у якому моделювались різні реологічні умови середовища. Для цього використовувався модельний матеріал, а цементному тісту аналогом стала водоглиняна суспензія з різним водоглиняним відношенням. Крім того, в моделях матеріалів пористої структури змінювався розмір пор. Моделі витримували умови закритого приміщення при температурі $22 \pm 2^\circ\text{C}$. В процесі висихання, коли видалялася вільна вода, змінювався зовнішній вигляд моделей. У моделях матеріалів щільної структури спочатку в однорідному середовищі з'являлись окремі тріщини, які з часом розвивались і перетинались, утворюючи мережу внутрішніх поверхонь розділу. У моделях матеріалів пористої структури спочатку були використані пороімітатори, які після досягнення певної міцності були витягнуті. Процес утворення внутрішніх поверхонь розділу відбувався в міжпорових перегородках. Встановлено, що у структурі щільно структурованого матеріалу збільшення водоцементного відношення веде до зниження фрактальної розмірності, тоді як у структурі пористого матеріалу величина фрактальної розмірності залежить від розміру пор: збільшення водоцементного відношення спричиняє зменшення фрактальної розмірності. Чим менші пори, тим вищою є фрактальна розмірність.

Отже, можна встановити прямий інформаційний причинно-наслідковий зв'язок між фрактальністю структури та фізико-механічними властивостями матеріалу, що відкриває можливість штучного отримання матеріалів із заданою структурою та передбачуваними характеристиками.

Висновки

- Висловлено припущення, що в патернах внутрішніх поверхонь розділу (ВІПР) закладено певну інформацію, яку можна кількісно оцінити за допомогою інструментів фрактальної геометрії. Фрактальність як універсальна характеристика природи є складовою частиною тріади «структура-фрактальність-інформація», яка виражає внутрішню єдність цих двох понять. Реалізація цієї тріади відкриває можливість для штучного створення матеріалів із заданою структурою та синтезу матеріалів з прогнозованими властивостями.

- Наведені результати експериментальних досліджень підтверджують ефективність запропонованого підходу, що дозволяє пояснити різний вплив водоцементного відношення на зміну міцності матеріалів щільної та пористої структури.

ДО РОЗРАХУНКУ КІЛЬЦЕВИХ ПЛАСТИН НА ЗМІННІЙ ПРУЖНІЙ ОСНОВІ

Сур'янінов М.Г., Крутій Ю.С., Кіріченко Д.О., Клименко О.М.
(Одеська державна академія архітектури та будівництва, м. Одеса)

Abstract. The article examines the bending of ring plates on a variable elastic base for a steel plate, and a concrete slab, which have different clamped along the outer contour, and inner contour.

Keywords: ring plate; Winkler model; finite element method.

Математичною моделлю багатьох конструкцій, що застосовуються в різних галузях промисловості є кільцева плита або пластина на пружній основі. Це відноситься до будівельних об'єктів, і, зокрема, до фундаментних плит. Існує безліч варіантів різних моделей пружної основи. Найпростішою з них є модель Вінклера, іншими словами пружинна модель. Умовно її можна представити, як ряд не пов'язаних між собою пружин, закріплених на абсолютно жорсткій основі. Поверхня цієї моделі за межами штампугавантаження не деформується. Для балок на постійній пружній основі модель Вінклера дозволяє отримати точне рішення, а для плит — навпаки.

Найскладнішим випадком є той, коли пружна основа є змінною. Через те, що не існує єдиного підходу для побудови універсального аналітичного рішення — в інженерній практиці застосовуються чисельні методи розрахунку.

У кільцевій пластині постійної циліндричної жорсткості D , що лежить на змінній пружній основі, та перебуває під дією безупинно розподіленого довільного поперечного навантаження, будуть виникати внутрішні зусилля: радіальний згинальний момент M_r , окружний згинальний момент M_θ і радіальна поперечна сила Q_r (рис. 1)[1].

За допомогою ПК ЛІРА-САПР було проведено дослідження вигину кільцевих пластин на змінній пружній основі з наступними розрахунками методом скінчених елементів. Для порівняння використовувався аналітичний метод прямого інтегрування. Розглянуто

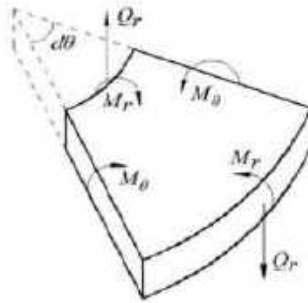


Рис. 1. Зусилля в кільцевій пластині

два варіанти: сталева плита, яка жорстко защемлена за внутрішнім контуром, а її зовнішній контур спирається шарнірно, та бетонна плита, яка жорстко затиснена по зовнішньому контуру, а її внутрішній контур закріплений шарнірно [2].

Сталева плита ($E = 2 \cdot 10^8$ кПа, $\mu = 0,33$) товщиною $h = 0,03$ м, зовнішнім радіусом $a = 0,9$ м, внутрішнім радіусом $b = 0,45$ м, яка перебуває під дією рівномірно розподіленого постійного навантаження $q = 30$ кПа — є жорстко затисненою за внутрішнім контуром, а її зовнішній контур спирається шарнірно. Коефіцієнт постелі змінюється за лінійним законом: $k(b) = 4000$ кН/м³, $k(a) = 5000$ кН/м³ (рис. 2).

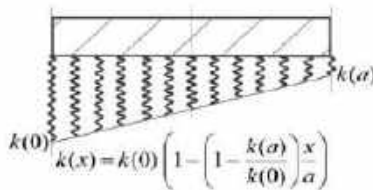


Рис. 2. Закон зміни коефіцієнту постелі для сталевієї плити

Паралельно із тим проводилося дослідження із бетонною плитою ($E = 1,5 \cdot 10^7$ кПа, $\mu = 0,167$) товщиною $h = 0,12$ м, зовнішнім радіусом $a = 1,8$ м, внутрішнім радіусом $b = 0,9$ м, яка перебуває під дією рівномірно розподіленого постійного навантаження $q = 80$ кПа. Плита жорстко затиснута по зовнішньому контуру, а її внутрішній контур закріплений шарнірно.

Коефіцієнт постелі (рис. 3) є постійним: $k(r) = const = 5000$ кН/м³.

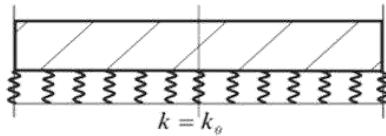


Рис. 3. Закон зміни коефіцієнту постелі для бетонної плити

Висновки.

Аналіз всіх результатів показує, що значення прогинів фактично збігаються при розрахунках кільцевої пластини авторським методом і методом скінчених елементів у ПК ЛІРА-САПР. Розбіжність значень згинальних моментів досягає близько 10 %. Можна помітити що, розбіжність у прогинах проявляється тільки в четвертому (а іноді й у п'ятому) знаку після коми.

В другому розглянутому варіанті кільцевої плити — прогини, обчислені двома методами, практично не відрізняються один від одного, а максимальна розбіжність згинальних моментів тут трохи менше, чим у попередньому прикладі — 9,6 %. Можна сказати, що метод прямого інтегрування продемонстрував дуже високу точність при розв'язку численних завдань, що мають точний розв'язок. Розбіжність, яка отримана у значеннях згинальних моментів пов'язана з напівавтоматичною розбивкою скінчено-елементної сітки в ПК ЛІРА-САПР. Цей висновок ґрунтується на тому, що при згущенні сітки в окружному напрямку відбувається істотне зближення результатів, які були отримані за двома методами при визначенні радіальних і окружних згинальних моментів.

1. Krutii Y.S., Surianinov M.G., Karnaukhova G.S. Calculation Method for Axisymmetric Bending of Circular and Annular Plates on a Changeable Elastic Bed. Part 1. Analytical Relations”, Strength of Materials. 2021. V. 53(2), P. 247-257.

2. Городецький Д.А., Барабаш М.С., Водоп'янов Р.Ю. та ін. Програмний комплекс ЛІРА-САПР. 2015. Навчальний посібник. За ред. академіка РААСН О.С. Городецького.:Електронне видання. 2015. 376 с.

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ФІБРОБЕТОНУ

Сур'янінов М.Г., Неутов С.П., Метлицький В.В., Чучмай С.М.
(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** A mathematical model of fiber-reinforced concrete with dispersed steel fiber reinforcement and a review of other most popular mathematical models have been developed. The authors propose the construction of a mathematical model of fiber-reinforced concrete based on the determination of its effective stiffness characteristics.*

***Keywords:** coverage, materials, defence*

При дослідженні фізико-механічних властивостей фібробетону застосовуються два підходи — феноменологічний і структурний. У нашій країні поширення має структурний підхід до дослідження властивостей фібробетону за аналогією із залізобетоном, що дозволяє на основі властивостей вихідних компонентів визначати необхідні характеристики міцності й деформативності. Такий підхід є зручним при розв'язку завдань оптимального проектування фібробетонних конструкцій.

Математична модель фібробетону на основі ефективних жорсткісних характеристик

Для побудови математичної моделі будемо використовувати рівняння лінійної теорії пружності:

рівняння рівноваги:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0; \quad (1)$$

співвідношення Коші:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right); \quad (2)$$

рівняння закону Гука:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}, \quad (3)$$

де C_{ijkl} — тензор жорсткості.

Рівняння (3) записані для загального випадку, і тут C_{ijkl} має 81 компоненту, але для реальних матеріалів їх число істотно знижується.

Для ізотропного тіла залишаються тільки дві незалежні компоненти, а вираження (3) ухвалює вид

$$C_{ij} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(C_{11} - C_{12}) \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Співвідношення між напруженнями і деформаціями:

$$\sigma_{ij} = \lambda \varepsilon_{kk} \delta_{ij} + 2\mu \varepsilon_{ij}, \quad (5)$$

де λ й μ — параметри Ламе, δ_{ij} — символ Кронекера.

Але, оскільки розглянуте середовище є гетерогенним, врахуємо відомий принцип Ешелбі, який дозволяє обчислити енергію деформування системи, що містить включення.

Будемо вважати, що умови на поверхні задані в напруженнях.

Позначимо напруження, деформації та переміщення через σ_{ij} , ε_{ij} і u_i , а ці ж величини для випадку, коли усередині елементарного об'єму немає фібрового волокна — через σ_{ij}^0 , ε_{ij}^0 і u_i^0 .

Енергія деформування для кожного із цих випадків запишеться у вигляді

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV; \quad (6)$$

$$U_0 = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij}^0 \varepsilon_{ij}^0 dV; \quad (7)$$

де V — елементарний об'єм.

Віднімаючи (7) з (6), одержимо

$$U = U_0 + \frac{1}{2} \int_V (\sigma_{ij} \varepsilon_{ij} - \sigma_{ij}^0 \varepsilon_{ij}^0) dV. \quad (8)$$

Застосовуючи до (8) теорему Остроградського-Гауса й враховуючи, що рівняння рівноваги для двох розглянутих випадків мають вигляд

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = 0; \quad \frac{\partial \sigma_{ij}^0}{\partial x_j} = 0,$$

одержимо

$$U = U_0 + \frac{1}{2} \int_S (\sigma_i u_i - \sigma_i^0 u_i^0) dS, \quad (9)$$

де S — поверхня тіла.

Оскільки граничні умови — однакові, на поверхні будемо мати

$$\sigma_i = \sigma_i^0, \quad (10)$$

і тоді

$$U = U_0 + \frac{1}{2} \int_S \sigma_i^0 (u_i - u_i^0) dS. \quad (11)$$

Опускаючи проміжні перетворення формули (11), які досить громіздкі, але докладно описані в багатьох підручниках з теорії пружності, приведемо остаточний вигляд формули Ешелбі, коли граничні умови задані в напруженнях:

$$U = U_0 + \frac{1}{2} \int_{S_1} (\sigma_i^0 u_i - \sigma_i u_i^0) dS. \quad (12)$$

Якщо ж граничні умови задані в переміщеннях, то формула Ешелбі записується так:

$$U = U_0 + \frac{1}{2} \int_{S_1} (\sigma_i u_i^0 - \sigma_i^0 u_i) dS. \quad (13)$$

У формулах (12) і (13) S_1 — поверхня фібрового волокна в елементарному об'ємі.

Використовуючи формули Ешелбі, перейдемо до визначення ефективних жорсткостей фібробетону, під якими будемо розуміти середні величини жорсткості, які враховують властивості всіх фаз фібробетону і їх взаємодію.

Вважаючи, що фіброві волокна розподілені за об'ємом рівномірно й знаючи відсоток фібрового армування, можна визначити умовно середню відстань між центрами ваги (або, що те ж саме, між геометричними центрами) окремих фібр. Ця відстань є характерним розміром неоднорідності фібробетону.

Розмір довжини осереднення (позначимо його через δ), у межах якого можна осереднити властивості фібробетону, використовуючи

статистичний підхід, значно більше, ніж розмір неоднорідності, але при цьому набагато менше характерних розмірів фібробетонної конструкції. Це означає, що існує якийсь проміжний розмір, у межах якого осереднення характеристик фібробетону є обґрунтованим.

Використовуючи процедуру осереднення, можна описати ефективні властивості фібробетону, як еквівалентного гомогенного середовища, через властивості фібри й бетону і їх геометричні параметри, а потім використовувати ці властивості в розрахунках фібробетонних конструкцій.

Розглянемо елементарний об'єм фібробетону, розміри якого порівнянні з масштабом осереднення \mathcal{S} .

Середні значення напружень і деформацій, що виникають при дії зовнішнього навантаження, будуть

$$\sigma_{ij}^m = \int_V \sigma_{ij}(x_i) dV; \quad (14)$$

$$\varepsilon_{ij}^m = \int_V \varepsilon_{ij}(x_i) dV. \quad (15)$$

Ефективні жорсткості C_{ijkl} визначаються співвідношенням

$$\sigma_{ij}^m = C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^m. \quad (16)$$

Оскільки, як ми вже відзначали вище, фібробетон розглядається нами як гетерогенна структура, що складається із двох ізотропних фаз, співвідношення між напруженнями і деформаціями можна записати для фібри у вигляді

$$\sigma_{ij}^f = \lambda_f \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu_f \varepsilon_{ij}, \quad (17)$$

а для бетону

$$\sigma_{ij}^b = \lambda_b \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu_b \varepsilon_{ij}, \quad (18)$$

де λ_f , λ_b , μ_f , μ_b — параметри Ламе.

Тепер (14) можна переписати так:

$$\sigma_{ij}^m = \frac{1}{V} \left(\int_{V_b} \sigma_{ij} dV + \sum_{n=1}^N \int_{V_f} \sigma_{ij} dV \right), \quad (19)$$

де N — кількість фібр в об'ємі V ;

$V_b = V - \sum_{n=1}^N V_f$ — об'єм бетону; V_f — сумарний об'єм N фібр.

А якщо тепер врахувати (18), то будемо мати

$$\sigma_{ij}^m = \frac{1}{V} \left[\int_V (\lambda_b \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu_b \varepsilon_{ij}) dV - \sum_{n=1}^N \int_{V_f} (\lambda_b \delta_{ij} \varepsilon_{kk} + 2\mu_b \varepsilon_{ij}) dV + \sum_{n=1}^N \int_V \sigma_{ij} dV \right].$$

Враховуючи (16) і інтегруючи перший доданок, одержимо

$$C_{ijkl} \varepsilon_{kl}^m = \lambda_b \delta_{ij} \varepsilon_{kk}^m + 2\mu_b \varepsilon_{ij}^m + \frac{1}{V} \sum_{n=1}^N \int_{V_f} (\sigma_{ij} - \lambda_b \delta_{ij} \varepsilon_{kk} - 2\mu_b \varepsilon_{ij}) dV.$$

Отримане вираження, яке дозволяє описати ефективні характеристики фібробетону при малому об'ємному змісті фібри. А, оскільки в наших попередніх роботах і в інших дослідженнях показано, що оптимальний зміст фібри за об'ємом конструкції в переважній більшості випадків становить (1-1,5)% (рідше – 2%, що теж можна віднести до малого об'ємного змісту), запропонований підхід до опису ефективних характеристик фібробетону має дуже широку область застосування.

Отримані в роботі залежності можна застосовувати не тільки для сталевих фібрових волокон, але й для будь-яких інших (полімерних, скляних і ін.), а конкретизація виражень для ефективних пружних характеристик буде залежати винятково від геометричної форми фібрового волокна й виду його деформації.

Стосовно до фібри із загнутими кінцями, використовуваної в наших дослідженнях, представляється можливим цю форму вважати циліндричною.

Висновки. Запропоновано побудову математичної моделі фібробетону на основі визначення його ефективних жорсткісних характеристик. У якості досліджуваного матеріалу в роботі розглядається фібробетон, виготовлений на основі сталевих фібри із загнутими кінцями. При побудові математичної моделі фібробетону важливим є визначення його ефективних властивостей, що, у свою чергу, припускає процедуру вибору й моделювання представницького об'єму матеріалу. Для побудови моделі використовуються рівняння лінійної теорії пружності. Але, оскільки розглянуте середовище є гетерогенним, враховується відомий принцип Ешелбі, який дозволяє обчислити енергію деформування системи, що містить включення. Отримані в роботі залежності можна застосовувати не тільки для сталевих фібрових волокон, але й для будь-яких інших (полімерних, скляних і ін.), а конкретизація виражень для ефективних пружних характеристик буде залежати винятково від геометричної форми фібрового волокна й виду його деформації.

1. Gediminas Marciukaitis, Remigijus Salna, Bronius Jonaitis, 2011, A model for strength and strain analysis of steel fiber reinforced concrete, *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 17(1), pp. 137-145.

2. Buljak, V., Oesch, T., & Bruno, G. (2019). Simulating Fiber-Reinforced Concrete Mechanical Performance Using CT-Based Fiber Orientation Data. *Materials*, 12(5), 717. doi:10.3390/ma12050717.

КЕРУЮЧІ ФАКТОРИ ПРОСТОРОВО-ЧАСОВИХ ПРОЦЕСІВ В АЛЮМО-СИЛКАТВМІСНИХ СИСТЕМАХ

Шинкевич О.С., Антонюк Н.Р., Луцкін Є.С., Рапоч К.В.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The paper presents the results of the analysis of the influence of the silica-containing component of chemo-biogenic origin on the structure and properties of non-autoclaved silicate matrix composites using ES models and formulates the main provisions on its multifunctionality.*

***Keywords:** experimental-statistical models, silicate matrix composites, non-autoclaved hardening, three-component lime-siliceous binder.*

Доктор технічних наук, професор, академік, видатний вчений Віталій Анатолійович Вознесенський, розробив та впровадив у будівельне матеріалознавство унікальні методики експериментально-статистичного моделювання, які продовжують розвиватися у роботах його друга, вченого, професора Т.В. Ляшенко.

У своїх працях вони наводять десятки різних варіантів рішень типових інженерних завдань будівельного матеріалознавства, які дозволяють побачити невидиме в ході лабораторних дослідних випробувань.

Як один із прикладів наведено дослідження композитів на алюмо-силікатній матриці. Відмінною особливістю композитів на такій матриці є те, що вони виготовляються на основі комплексної трикомпонентної активованої алюмо-силікатобетонної суміші, модифікованої лужними і мінеральними добавками, і тверднуть при температурі 85°C і нормальному атмосферному тиску. За рахунок реалізації комплексної активації високорухливої алюмо-силікатобетонної суміші, що є однією з технологічних особливостей отримання даного виду композитів, забезпечені низько-енергозберігаючі режими обробки. Композити та вироби на їх основі характеризуються зниженою щільністю при досить високих значеннях міцності, водо-, тріщиностійкості та теплоємності, завдяки яким створюються комфортні умови зі стабільним температурним режимом протягом доби [1].

Як один з компонентів в'язучого використаний хімічно активний аморфно-кристалічний кремнезем хемо-біогенного генезису з

оптимальним введенням до складу в'язучого кремнеземовмісного компонента хемо-біогенного походження з різною питомою поверхнею та ультрадисперсною пористістю, забезпечено його поліфункціональний вплив на структуру та властивості композицій на алюмосилікатній матриці.

На сьогоднішній день відсутні чіткі уявлення про різну функціональну роль і вплив на структуру та властивості кремнеземовмісних компонентів хемо-біогенного генезису та їх відмінностей, які раніше глибоко не досліджувалися і використовувалися або як активні мінеральні добавки, або наповнювачі. Слід зазначити, що термін «наповнювач», так і термін «мінеральна добавка», не розкривають механізм впливу цих компонентів на особливості структуроутворення і властивості композитів.

В роботі проведено порівняльний аналіз впливу питомої поверхні гелево-кристалічного компонента на зміну структури та властивостей алюмо-силікатної матриці з одного боку та поризованих композитів на основі алюмо-силікатної матриці, модифікованих луговмісними добавками, з іншого. Аналіз проведено на основі експериментально-статистичного моделювання даних двох натурних експериментів [1, 2].

Відносний вплив δY питомої поверхні гелево-кристалічного компонента та його порівняння з впливом інших досліджуваних факторів на зміну властивостей та параметрів структури алюмо-силікатної матриці та поризованих композитів візуалізовано у вигляді стовпчастих діаграм. Показано, що на зміну властивостей силікатної матриці вплив питомої поверхні гелево-кристалічного компонента рівнозначно впливу умов твердіння (тривалість попереднього витримання у н.у. і тривалість ТВО) (рис.1).

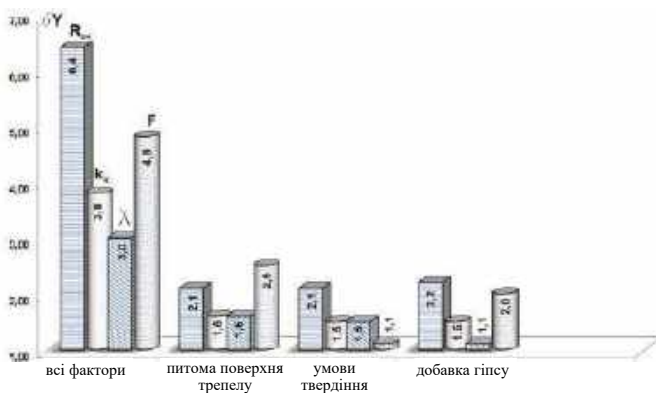


Рис. 1. Відносний вплив досліджуваних факторів та їх взаємодій на зміну властивостей силікатної матриці

На зміну властивостей поризованих композитів вплив питомої поверхні гелево-кристалічного компонента рівнозначний впливу двох лужних добавок (NaOH + рідке скло) (рис. 2).

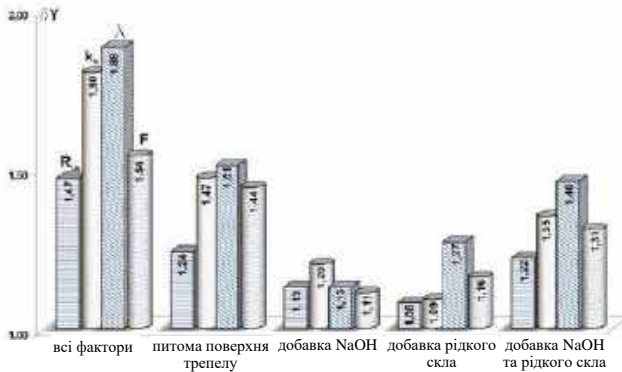


Рис. 2. Відносний вплив досліджуваних факторів та їх взаємодій на зміну властивостей поризованих композитів

Слід зазначити, що якщо вплив питомої поверхні гелево-кристалічного компонента хомогенного походження значно перевищує вплив умов твердіння окремо для силікатної матриці та вплив кожної з лужних добавок окремо для поризованих композитів, то взаємодія питомої поверхні гелево-кристалічного компонента з цими ж факторами багаторазово посилює їх вплив на структуру та властивості силікатної матриці та поризованих композитів.

На підставі проведеного аналізу запропоновано та обґрунтовано механізм формування структури та властивостей силікатної матриці [2]. Показано, що колоїдні компоненти та кристалічні частинки сприяють «фізичному» ущільненню структури силікатної матриці та утворення переривчастої структури капілярів, у тому числі за рахунок власної мікропористості. Крім того, в результаті високої сорбційної здатності їх пори можуть бути матрицею для формування гідросилікатів ультрадисперсних розмірів, властивості яких суттєво відрізняються від властивостей гідросилікатів кальцію, що утворилися у вільному просторі суміші, що сприяє одержанню поризованих композитів з високими фізико-механічними властивостями.

Таким чином, гелево-кристалічний компонент виконує поліфункціональну роль. На основі аналізу результатів експериментально-статистичних моделей встановлено суттєвий вплив

питомої поверхні колоїдно-дисперсної та мікрогетерогенної дисперсних систем, що порівняно з впливом на алюмо-силікатну матрицю умов твердіння, у тому числі ТВО, а для поризованих композитів на її основі – з лужною активацією суміші .

Виконуючи роль «фізично-хімічно активного» компонента, хомогенний компонент забезпечує зниження щільності та теплопровідності матеріалу. Як компонент в'язучого, що має ультрадисперсну пористість, він впливає на механізм формування структури і властивостей щільних і пористих композитів і на їх зміну в просторі і в часі, будучи нанореактором для утворення та росту ультрадисперсних гідросилікатів кальцію всередині частинок пористих мембран.

1. Shinkevich E. Development of scientific bases of the introduction lime-silica building composites of non-autoclave hardening. Thesis (D.Sc. in Eng.). Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2008. 32 p.

2. Lutskin Y., Shinkevich E. Aerated Complex Activated Composites on Silicate Matrix of Thermal-moisture Hardening. Proceeding of 14th Int. Congress on the Chemistry of Cement. Abstract Book. Beijing, China, 2015. Volume 2. P. 632.

TOPOLOGICAL MODELING AND OPTIMIZATION OF TECHNOLOGY OF COMPOSITE MATERIALS

Trofimova L.E.

(Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

***Abstract:** For disclosing the essence of the phenomena and processes, which regulate disperse systems formation we suggest using the Catastrophe Theory. All the variety of the situations met in practice can be presented in a small number of canonical models.*

***Keywords:** composite materials, disperse systems, structure formation, topological approach.*

As is known [1], the formation of many buildings composite materials under dynamic nonequilibrium conditions is inextricably linked to the emergence of diverse structured disperse systems at all stages of the process of structure formation. These dispersions are characterized not only by a strongly developed interfacial surface, but also by the evolution of dispersed structures being formed in them. This phenomenon is reflected in the non-standard run of rheological curves.

In terms of synergetics, such dispersed composites are construed as complex nonequilibrium physicochemical systems, the development of which is accompanied by self-organization of dissipative structures [2, 3]. Therefore, to identify the common patterns of behavior of such systems, it is proposed to use a topological approach based on the possibility of modeling of transition of smooth quantitative changes to radical qualitative changes, catastrophe theory [4, 5].

Based on the analysis of numerous experimental results, a similarity of anomalous *S*- and *N*-shaped rheological, kinetic, and other graphical dependencies representing step-like phenomena in various systems and standard curves of stationary states was revealed. As is known, the concept of the multiplicity (nonuniqueness) of stationary states and their instability as a potential source of evolution of systems being far from thermodynamic equilibrium (when nonlinear effects occur) underlies I. Prigogin's nonlinear thermodynamics [2]. A change in the number of stationary states with a simultaneous change in the type of stability occurs at bifurcation values of

the control parameter, which correspond to kinks of the S-shaped curve of stationary states; it is the multiplicity of stationary states that determines the hysteresis effects. Hysteresis is one of the main qualitative features of the catastrophe «ruffle», which is widely used in modeling various phenomena. The presence of hysteresis loops on *S*-anomalous rheological graphical dependencies made it possible to apply a topological approach to simulate the general picture of processes occurring in disperse systems when external force fields are applied. It should be noted that in the case of *N*-shaped kinks on the graphs, a catastrophe of the type «fold» is applicable.

In the framework of the proposed approach, the experimental dependences revealed the representation of two main directions connecting the geometry of catastrophes of the type «ruffle» with the system under study (maximum delay principle and Maxwell principle). The choice of a specific principle is determined by the nature of the phenomenon itself.

The model «ruffle» (the principle of maximum delay) describes the evolution of the effect of *S*-anomaly of the dispersion course during shear, which makes it possible to identify the most significant features of the appearance of zones of increased density and the formation of discontinuities of continuity. It was also established that such a model representation clearly illustrates the experimental effects being observed when a vibration with optimal parameters is applied to a deformable system. In a generalized schematic form, it has been demonstrated that the features of the behavior of dispersions under conditions of a combination of continuous shear with vibration being orthogonally directed towards it (in accordance with [1]) contribute to the formation of a set structure of the composite material, which determines its operational indicators.

The model «ruffle», the geometry of which obeys the Maxwell principle, describes the effect of a continuum violation in changing the linear velocity along the cross section of the clearance between the coaxial cylinders of a rotational viscometer when a certain critical velocity of dispersion deformation is exceeded. In this situation, the geometry of the model is similar to the configuration of the so-called shock wave, for which steep profile drops are typical [2].

A list of possible types of schematic images of the linear velocity distribution profiles in the operating clearance of the viscometer is proposed, while their relationship with various variants of structural changes in the shear flow due to the use of the theory of nonlinear waves is established. Since rigorous mathematical analysis is quite difficult, it is advisable to establish the most significant features of the formation of discontinuities on the quality grounds on the basis of analogy with studies of collective phenomena in plasma, where the model concept of a shock wave is also used [6]. The nature

of the structure of the shock wave is governed by the viscosity of the system under study. If the viscosity is sufficiently low, then the overall qualitative profile shape corresponding to a velocity step is a shock wave with a damping oscillating structure being located ahead of its front (packet of solitons). The lower the viscosity, the greater the number of oscillations (discontinuities). As the viscosity increases, an ordinary shock wave without oscillations with a monotonic structure is present. Thus, ordinary aperiodic shock waves and soliton packets are construed as different limit situations for the same nonlinear process. As applied to disperse systems, these model representations are consistent with experimental results: single and multiple effects of continuum disturbance in the change of velocity along the cross section of the viscometer clearance correspond to monotonic and oscillating profiles.

An analogy of the phenomenon of the formation of discontinuities of continuity with the formation of a cluster of particles («birth of pancakes»), according to Zel'dovich theory, taking into account the two above principles [7] is revealed. In accordance with the principle of maximum delay, a model for the appearance of three-stream (*S*-shaped) configurations has been considered. Such an approach is appropriate in interpreting the effect of compression of structured dispersions; collapse leads to lamination and breaches in the system. The second approach illustrates, through ideas about the shock wave, the origination of compacted regions during shear deformation. The proposed interpretation describes the process of «layering» of particles of solid phases, contributing to the formation of a compacted structure.

Thus, the involvement of a topological approach opens up new possibilities in modeling and optimization real situations with sudden catastrophic rearrangements of regimes in developing dynamic systems.

1. Uriev N.B. Technology of Dispersed Systems and Materials: Physicochemical Dynamics of Structure Formation and Rheology. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2017. 192 p.

2. Nicolis G. and Prigogine I. Self-Organization in Nonequilibrium Systems. New-York, John Wiley & Sons, 1977. 491 p..

3. Sukhanov V., Vyrovoy V. and Korobko O. Material Structure in Structure of Construction. Odesa: OSACEA, 2022. 412 p.

4. Poston T. and Stewart I. Catastrophe Theory and its Applications. London, San Francisco, Pitman, 1978, 491 p.

5. Trofimova L. Modeling and Optimization of Technology and Physics-Mechanical Properties of Composite Materials. Key Engineering Material, 2020, Vol. 864, pp. 59-65.

6. Kadomtsev B.B. Collective Phenomena in Plasma. M.: Nauka, 1976, 240 p.

7. Zel'dovich Ya. B. Formation of the Large-scale Structure of the Universe. Astronomy Letters, 1982, Vol. 8, No. 4, pp. 195-197.

Секція 2.

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА
ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ**

ОПТИМІЗАЦІЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕТОНУ ЗА ДОПОМОГОЮ МЕТОДІВ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М.

(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

***Abstract.** Examples of the main technological problems that can be solved on the basis of an experimental-statistical (polynomial) model of concrete strength are given. A analysis of such a model is carried out to determine the influence of the factors of the concrete mixture composition.*

***Keywords:** mathematical modeling, optimization, concrete composition factors, analysis.*

Структурування і формування властивостей бетону є комплексом складних фізичних, хімічних і фізико-хімічних процесів, що відбуваються, починаючи від замішування бетонної суміші водою і протягом значного часу його тверднення і роботи в реальних конструкціях і спорудах [1]. На сучасному етапі, незважаючи на величезні успіхи бетонознавства далеко не всі ці процеси висвітлені в достатній мірі. Це утруднює, а в багатьох випадках не дозволяє, спираючись на структурно-фізичні уявлення отримувати розрахункові залежності для властивостей бетону з достатньою прогнозуючою здатністю і враховувати вплив на них певних комплексів факторів. В цих умовах для прогнозування і управління властивостями бетону ефективним є кібернетичний метод. Відомо, що кібернетику можна розглядати як науку про керування складними системами. До таких складних стохастичних систем відноситься і технологія бетону, завдання якої в кінцевому рахунку можна бачити в тому, щоб, регулюючи фактори на "вході", тобто до виготовлення бетону, виробів і конструкцій на його основі, оптимальним чином забезпечити якість продукції на "виході" після завершення виробничих процесів.

В наш час широке розповсюдження отримали методи математичного моделювання, що використовуються при дослідженні впливу технологічних параметрів на властивості бетонів та бетонних

сумішей. Найбільш перспективними для задач прогнозування і керування властивостями бетону є експериментально-статистичні моделі – різновид математичних моделей, отриманих статистичною обробкою експериментальних результатів.

Відомий вчений-матеріалознавець, розробник і активний популяризатор математичних методів в галузі будівельних матеріалів Вознесенський В.А. дав схеми рішення десяти основних технологічних задач [2, 3], що можуть бути розв'язані індивідуально чи спільно на основі однієї експериментально-статистичної (поліноміальної) моделі. Комплексне розв'язання цих задач дає максимум технологічної інформації при мінімальних витратах експериментальної роботи та дозволяє вибрати оптимальне рішення.

В даній статті наведено приклад комплексного аналізу поліноміальної моделі міцності бетону в розрізі розв'язування таких задач. Модель була побудована з метою визначення впливу факторів складу бетонної суміші на ефективність дії пластифікуючої добавки. В результаті реалізації типового чотирьохфакторного плану типу В₄ [4] і статистичної обробки результатів отримано наступну модель:

$$Y = 57,3 - 1,6x_1 + 22,9x_2 + 7,2x_3 - 1,6x_4 - 0,4x_1^2 - 1,6x_2^2 - 0,4x_3^2 - 2,8x_4^2 - 1,4x_1x_2 + 2,5x_2x_3, \quad (1)$$

де Y – міцність бетону, МПа; $x_1 = (B-190)/30$; $x_2 = (Ц/В-2,5)/1$; $x_3 = (R_{ц} - 58,75)/9,35$; $x_4 = (Д-0,25)/0,25$; (B – витрата води, кг/м³; $Ц/В$ – цементно-водне відношення; $R_{ц}$ – активність цементу, МПа; $Д$ – вміст пластифікуючої добавки, % від маси цементу).

1. Інтерполяційна задача. Розв'язання інтерполяційних задач дозволяє знайти значення вихідного параметра в межах області варіювання факторів від -1 до $+1$. Підставляючи в отримане рівняння регресії кодовані значення кожного фактора одержуємо значення вихідного параметра при будь-яких проміжних поєднаннях факторів.

Розрахуємо, наприклад, значення вихідного параметра (міцності бетону) при зміні фактора x_2 – цементно-водного відношення (табл. 1). Інші фактори прийняті на нульовому (основному) рівні: $B = 190$ кг/м³, $R_{ц} = 58,75$ МПа, $Д = 0,25\%$. Рівняння регресії (1) тоді прийме вигляд:

$$\hat{y} = 57,3 + 22,9x_2 - 1,6x_2^2 \quad (2)$$

Таблиця 1 – Результати інтерполяції за рівнянням (2)

x_2 (кодований вид)	-0,8	-0,6	-0,5	-0,4	-0,2	0,2	0,4	0,5	0,6	0,8
Ц/В (натуральний вид)	1,7	1,9	2,0	2,1	2,3	2,7	2,9	3,0	3,1	3,3
R_6 , МПа	38,0	43,0	45,5	47,9	52,7	61,8	66,2	68,4	70,5	74,6

2. Екстраполяційна задача. Розв'язання екстраполяційних задач дозволяє прогнозувати значення вихідного параметра за межами області варіювання факторів, наприклад, при $x_j = 1,1; 1,2; 1,3$. Однак необхідно мати на увазі, що екстраполяція може бути пов'язана з певними помилками в передбаченні і ці помилки стають більш помітніші, чим далі вихід за межі області варіювання. Екстраполяція можлива, якщо у дослідника немає сумнівів, що за межами області варіювання факторів характер функції залишається без змін.

Розв'язок екстраполяційної задачі за рівнянням (2) і фіксації інших факторів на нульовому рівні наведений у табл. 2.

Таблиця 2 – Результати екстраполяції за рівнянням (2)

Ц/В (кодований вид)	-1,3	-1,2	-1,1	1,1	1,2	1,3
Ц/В (натуральний вид)	1,2	1,3	1,4	3,6	3,7	3,8
f_{cm} , МПа	24,8	27,5	30,2	80,6	82,5	84,4

3. Аналітико-геометрична задача. Розв'язання аналітико-геометричних задач дозволяє на основі рівнянь регресії побудувати графіки і номограми для визначення значень вихідних параметрів в межах області варіювання факторів.

Якщо всі фактори крім Ц/В (x_2) і $R_c(x_3)$ прийняти на нульовому рівні ($B=190 \text{ кг/м}^3$, $D=0,25\%$), то рівняння регресії (2) набуде виду:

$$\hat{y} = 57,3 + 22,9x_2 + 7,2x_3 - 1,6x_2^2 - 0,4x_3^2 + 2,5x_2x_3. \quad (3)$$

За рівнянням (3) можна побудувати поверхню відгуку Y у тривимірному просторі (рис. 1).

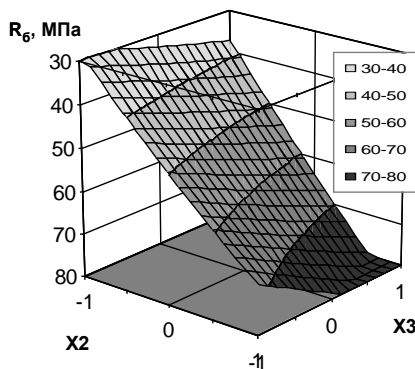


Рис. 1. Поверхня відгуку міцності за моделлю (1)

4 і 5. Задачі досягнення мінімального або максимального значення Y. Вони полягають в знаходженні такого поєднання факторів, яке забезпечує максимальне (мінімальне) значення вихідного параметра – критерію ефективності при заданих обмеженнях. У цьому випадку екстремум можна знаходити шляхом диференціювання рівняння послідовно за x_1, x_2, \dots, x_j . Отримана система лінійних рівнянь прирівнюється до нуля. Шляхом її розв'язання знаходять значення x_j , що забезпечують екстремальне значення Y.

Наприклад, необхідно визначити значення факторів $x_1 \dots x_4$, які забезпечують мінімально або максимально можливі значення міцності бетону за рівнянням (1). Диференціюємо рівняння регресії (1) і прирівнюємо часткові похідні до нуля, а також аналізуємо значення вихідного параметру на межі області варіювання факторів.

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{y}}{dx_1} = -1,6 - 0,8x_1 - 1,4x_2 = 0; & \quad \frac{d\hat{y}}{dx_2} = 22,9 - 3,2x_2 - 1,4x_1 + 2,5x_3 = 0; \\ \frac{d\hat{y}}{dx_3} = 7,2 - 0,8x_3 + 2,5x_2 = 0; & \quad \frac{d\hat{y}}{dx_4} = -1,6 - 5,6x_4 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Розв'язавши отриману систему (4), наприклад, методом Гауса, отримаємо $x_1 = 9,94$, $x_2 = -6,82$, $x_3 = -12,33$, $x_4 = -0,29$, тобто точка екстремуму лежить за межами області варіювання. Тому доцільно визначити значення функції в границях області варіювання.

Аналіз рівняння регресії (1) дозволяє зробити висновок про те, що його максимум в межах вивченої області буде досягатися при $x_1 = -1$, $x_2 = x_3 = 1$, x_4 – близько до 0, а мінімум – при $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = x_3 = -1$. Розрахуємо значення міцності бетону в деяких характерних точках (у загальному випадку потрібен перебір всіх значень на межі області варіювання факторів). Найбільше значення міцності, що становить 90,7 МПа, досягається при $x_1 = -1$, $x_2 = x_3 = 1$, $x_4 = 0,29$, а найменше (22,7 МПа) – при $x_1 = x_4 = 1$, $x_2 = x_3 = -1$.

Мінімізація або максимізація Y може досягатися також перебором всіх комбінацій x_1, x_2, x_3, x_4 на рівнях від -1 до +1 з кроком квантування Δx_i , аналізом рівняння канонічної форми, а також за допомогою метода невизначених множників Лагранжа.

6. Задача управління при фіксованому Y. Задача управління полягає у визначенні таких комбінацій факторів, що забезпечують задані показники вихідного параметру. Для цього з отриманого рівняння регресії (наприклад, міцності бетону) вибирають найбільш значимий фактор (зазвичай Ц/В).

Розв'язуючи рівняння регресії щодо цього фактора, визначають необхідне його значення, яке забезпечує при зміні інших факторів задане значення вихідного параметру.

В результаті розрахунків за рівнянням (1) побудована номограма (рис. 2), за допомогою якої при зміні конкретних технологічних факторів можна уточнювати значення Ц/В і корегувати склад бетону. Наприклад, для бетону з проектною міцністю 40 МПа при $V = 180$ кг/м³ (а), $R_{тс} = 50$ МПа (b), $D = 0,2\%$ (c), Ц/В = 2,05 (d).

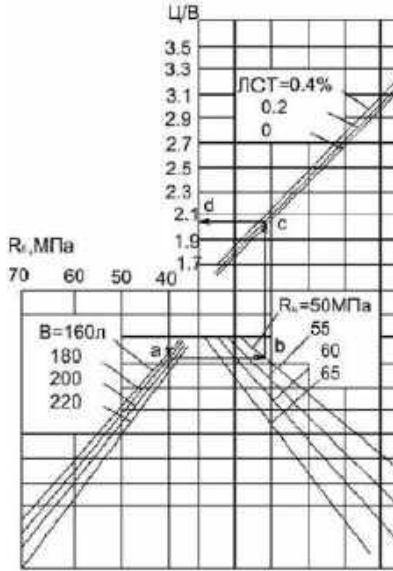


Рис. 2. Номограма визначення цементно-водного відношення для бетону різних марок залежно від активності цементу, витрати води і добавки ЛСТ

7. Задача мінімізації ресурсів x_i при фіксованому Y . В моделі (1) основним ресурсом, що визначає вартість бетону, є витрата цементу, що прямо пропорційна Ц/В. Тому мінімальне Ц/В, яке можна визначити з номограми (рис. 2) при мінімальному вмісті води буде відповідати мінімальній витраті цементу. Наприклад, для бетону міцністю 40 МПа мінімальна витрата цементу досягається при $V = 160$ л і Ц/В = 2,0.

8 і 9. Управління Y при двох або одному змінних факторах. Управління при фіксованому Y виконується шляхом побудови ізоліній (для двох незалежних факторів x_i) або однофакторних залежностей.

Наприклад, для побудови ізоліній від факторів x_2 і x_3 використаємо уже отримане раніше рівняння (3). Задаючись можливими значеннями Y і приводячи рівняння до вигляду $x_3 = f(x_2)$, побудуємо шукані ізолінії (рис. 3). З рис. 3 випливає, що для досягнення, наприклад міцності

бетону 60 МПа на цементі з активністю 50 МПа слід прийняти Ц/В = 3,0 ($x_2 = 0,5$), а на цементі з активністю 60 МПа – Ц/В = 2,6 ($x_2 = 0,1$) при інших однакових факторах ($B = 190 \text{ кг/м}^3$, $D = 0,25\%$).

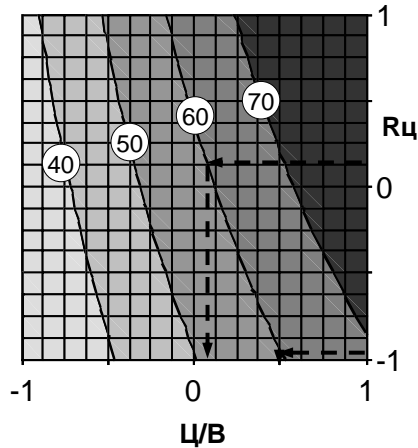


Рис. 3. Ізолінії міцності за моделлю (1)

Прикладом однофакторних залежностей, які можна розрахувати на основі моделі (1) є рівняння (2). Воно дозволяє управляти міцністю бетону (Y) змінюючи фактор x_2 (Ц/В) при постійному значенні інших змінних факторів (x_1, x_3 і x_4).

10. Аналіз ефекту впливу окремих факторів. Для оцінки ступеню впливу окремих факторів побудуємо однофакторні моделі (табл. 3).

Таблиця 3 – Результати розрахунку впливу окремих факторів на міцність Y за рівнянням (1)

Досліджуваний фактор		Однофакторна модель*	Значення Y , МПа		ΔY
Натуральний	Код		min	max	
$B, \text{кг/м}^3$	x_1	$y = 57,3 - 1,6x_1 - 0,4x_1^2$	55,3	58,5	3,2
Ц/В	x_2	$y = 57,3 + 22,9x_2 - 1,6x_2^2$	32,8	78,6	45,8
$R_c, \text{МПа}$	x_3	$y = 57,3 + 7,2x_3 - 0,4x_3^2$	49,7	64,1	14,4
Д, % від Ц	x_4	$y = 57,3 - 1,6x_4 - 2,8x_4^2$	52,9	57,5	5,4

* Інші фактори прийняті на нульовому рівні.

Аналіз отриманих даних показує, що за ступенем значимості фактори можна розташувати в ряд $x_2 > x_3 > x_4 > x_1$. При цьому збільшення факторів x_2 і x_3 призводить до зростання Y , а фактора x_1 – до зменшення Y . При достатньо високих квадратичних коефіцієнтах для окремих факторів (співствано з лінійними коефіцієнтами) може виникати ситуація як для фактора x_4 . Збільшення фактора x_4 у межах від 0 до 0,18% призводить до росту міцності, подальше збільшення x_4 – до зменшення міцності за інших рівних умов. За моделями, наведеними в табл. 3, можна також побудувати однофакторні графічні залежності, які дозволяють наочно спостерігати за особливостями впливу того чи іншого фактора.

Отже, як видно з наведеного прикладу, експериментально-статистичні моделі є потужним засобом аналізу та керування властивостями бетону і дозволяє вирішувати комплекс задач прогнозування властивостей бетону та керування технологічними процесами.

1. Дворкін Л.Й., Дворкін О.Л. Основи бетонознавства. К.: Основа, 2007. 616с.
2. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К: Вища школа, 1989. 328с.
3. Вознесенский В.А., Выровой В.М., Керш В.Я. и др. Современные методы оптимизации композиционных материалов. К.: Будівельник, 1983. 144 с.
4. Dvorkin L., Dvorkin O., Ribakov Y. Mathematical Experiments Planning in Concrete Technology. Nova Science Publishers , New York, USA, 2012. 172 p.

ОБҐРУНТУВАННЯ ДОЦЇЛЬНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПІНОІЗОЛУ

Дзюбенко А.Ю., Ковальський В.П.

(Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця)

Abstract. *An analysis was conducted and the need to increase the energy efficiency of residential buildings was noted by insulating walls using modern types of insulation.*

Keywords: *energy efficiency, insulation, thermal resistance, thermal conductivity coefficient.*

Питання підвищення енергоефективності та енергозощадження житлових будинків на сьогоднішній день вкрай актуальна проблема, яка потребує як найшвидшого вирішення.

Необхідність проведення утеплення стін житлових будинків існує досить давно. В першу чергу з 1 вересня 2022 року вступив в силу ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [1-3], згідно якого приведений термічний опір зовнішніх стінових огорожуючих конструкцій для I температурної зони повинен становити $R_{q \min}=4,00$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$) та для II температурної зони $R_{q \min}=3,50$ ($\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$). Також на необхідність проведення утеплення безпосередньо вплинула нинішня складна ситуація із обмеженими енергоресурсами для опалення житлового фонду, а саме обмежений обсяг природного газу та наявні ризики відключення.

Тому вкрай необхідно і важливо проводити утеплення стін житлових будинків, що забезпечить досягнення необхідного термічного опору стінової конструкції, будинки потребуватимуть меншу кількість теплової енергії для опалення. Також раціонально використовувати сучасні види утеплювачів із низьким коефіцієнтом теплопровідності.

Результати дослідження. Досить велика кількість теплової енергії втрачається через стіни житлових будинків, які не мають утеплення. Для того, щоб забезпечувати зберігання тепла усередині будинку, необхідно підбирати якісні сучасні теплоізоляційні матеріали та проводити теплоізоляцію стін будинку [4-6].

На сьогоднішній день існує вдосталь різноманітних видів утеплювачів, які різняться між собою коефіцієнтом теплопровідності, щільністю, паропроникністю, вартістю [7-9]. Найчастіше при виборі виду утеплювача звертають увагу на два показники- коефіцієнт теплопровідності та вартість, тобто ціна-якість матеріалу, хоча і інші показники теж варто враховувати при виборі матеріалу. Обрати якісний теплоізоляційний матеріал досить важливо, тому що правильний підбір теплоізоляційних матеріалів відіграє велику роль [10-13]. У табл. 1 виконано порівняння за параметрами чотирьох видів утеплювачів- мінеральної вати, пінополістиролу, піноізолу та пінополіуретану.

Таблиця 1 – Порівняння мінеральної вати, пінополістиролу, піноізолу та пінополіуретану

Параметри	Вид утеплювача			
	Мінераль-на вата	Пінополі-стирол	Піноізол	Пінополіуретан
Теплопровідність Вт/(м*К)	0,046	0,05	0,038	0,035
Паропроникність мг/(м*год*Па)	0,04	0,03	0,024	0,02
Вартість грн	4000	3600	2400	7000
Середня щільність кг/м ³	80	40	20	25
Температури використання °С	-40+120	-100+80	-50+120	-160+150

На якість виду утеплювача впливає саме коефіцієнт теплопровідності. Коефіцієнт теплопровідності- це кількість теплоти, яка проходить через одиницю площі матеріалу за одиницю часу. І чим нижчий коефіцієнт теплопровідності, тим матеріал за певну одиницю часу пропустить меншу кількість тепла, а отже утеплення таким матеріалом є більш ефективним.

Згідно таблиці 1 найнижчий коефіцієнт теплопровідності має пінополіуретан - 0,035 (Вт/(м*К)), тобто із обраних чотирьох видів утеплювачів даний матеріал є найефективнішим з точки зору теплоізоляції. Коефіцієнт теплопровідності піноізолу становить 0,038 (Вт/(м*К)), що теж досить чудовий показник у порівнянні з мінеральною ватою або пінополістиролом. Але враховуючи вартість матеріалів, коли піноізол дешевший за пінополіуретан приблизно в три рази, піноізол має перевагу перед пінополіуретаном саме через вартість матеріалу.

Тому використовувати утеплювач із низьким коефіцієнтом теплопровідності є раціонально, адже чим нижчий коефіцієнт теплопровідності – тим менша необхідна товщина утеплювача для досягнення необхідного термічного опору стінової конструкції. Низькі коефіцієнти теплопровідності мають саме сучасні види утеплювачів. Але для доведення варто порівняти необхідну товщину декілька видів утеплювачів при проведенні утеплення стіни.

Для прикладу ефективності використання при утепленні стін сучасних видів утеплювача із низьким коефіцієнтом теплопровідності був виконаний теплотехнічний розрахунок для обраної стінової конструкції, стіна із цегли товщиною 380 мм, для порівняння використовували три види утеплювачів - мінеральна вата, пінополістирол та піноізол. Результати наведені на діаграмі 1.

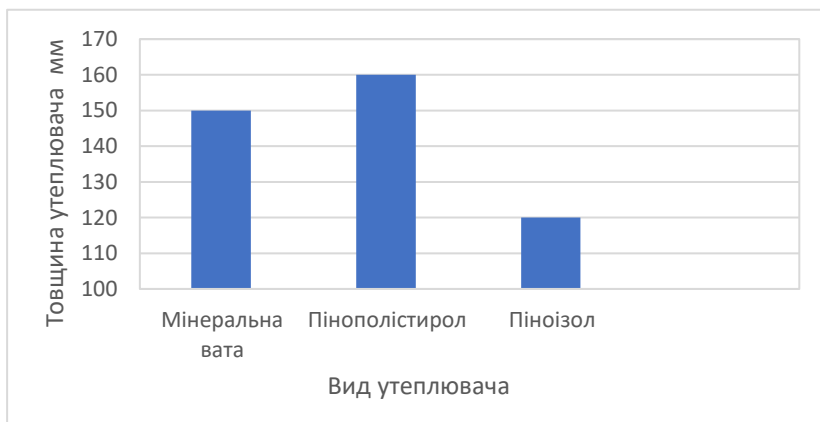


Рис. 1. Залежність мінімальної товщини від виду матеріалу

Після проведення теплотехнічного розрахунку із трьома видами утеплювачів отримана необхідна товщина утеплювачів мінеральної вати, пінополістиролу та піноізолу. За однакової конструкції стіни необхідна товщина мінеральної вати складає 150 мм, пінополістиролу 160 мм, піноізолу 120 мм. І нічого дивного, адже чим нижчий коефіцієнт теплопровідності матеріалу- тим менша необхідна товщина утеплювача. Це вкотре доводить про раціональність використовувати сучасні види утеплювачів при проведенні робіт по утепленню стін будинку.

Тому після виконання порівняння необхідної товщини трьох видів утеплювачів можна зауважити, що утеплення стіни піноізолом є раціональне, так як у порівнянні із іншими матеріалами необхідна

товщина утеплювача буде меншою. Також піноізол є раціональним до використання з економічної точки зору. Піноізол має хороші показники, через що є ефективним сучасним видом утеплювача.

Висновки. Отже, проведення утеплення стін житлових будинків для підвищення енергоефективності на сьогодні вкрай актуальне. Стіни житлових будинків повинні мати необхідний приведений термічний опір згідно сучасних вимог. Тому і важливо проводити утеплення стін будинку, використовуючи сучасні види утеплювачів, які мають низький коефіцієнт теплопровідності, в результаті можна запроєктувати мінімальну необхідну товщину утеплювача. Одним із таких сучасних видів утеплювача є піноізол, тому використання піноізолу для утеплення стін житлових будинків на сьогоднішній день вкрай актуальне.

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Київ. Міністерство розвитку громад та територій України 2022.

2. Чумак Ю. Ю., Вознюк І. М., Ковальський В. П. Мінеральна вата для утеплення та звукоізоляції будинків. Матеріали ЛІІІ науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 20-22 березня 2024 р. Електрон. текст. дані. 2024. URI: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2024/paper/view/20456>.

3. Kalafat, K., L. Vakhitova, and V. Drizhd. "Technical research and development." International Science Group. Boston : Primedia eLaunch, 616 . (2021).

4. Ковальський В. П. Енергозбереження при реконструкції житлової секції застарілої серії [Текст] / В. П. Ковальський, Д. П. Щербань // Сучасні технології, матеріали і конструкції в будівництві. 2013. № 2. С. 116-118.

5. Лемешев М.С. Легкі бетони отримані на основі відходів промисловості / М. С. Лемешев, О.В. Березюк // Сборник научных трудов SWorld. – Иваново : МАРКОВА АД, 2015. № 1 (38). Том 13. Искусствоведение, архитектура и строительство. С. 111-114.

6. Кушнір М.М. Методи та способи утеплення житлових будинків [Електронний ресурс] / М. М. Кушнір, А. В. Бондар, В. П. Ковальський // Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції "Інноваційні технології в будівництві, Вінниця", 10-12 листопада 2020 р. Електрон. текст. дані. Вінниця: ВНТУ, 2020. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/itb/itb2020/paper/view/10818>.

7. Ковальський В. П. Підвищення ефективності в житлово-комунальному господарстві [Текст] / В. П. Ковальський, В. П. Очеретний, М. О. Постолатій // Матеріали науково-практичної конференції "Енергія. Бізнес. Комфорт", 26 грудня 2018 р. Одеса : ОНАХТ, 2019. С. 2-3.

8. Вознюк І. М. Проблема енергозбереження та шляхи її вирішення у багатоквартирних житлових будинках [Електронний ресурс] / І. М. Вознюк, В. П. Ковальський, А. В. Ковальський // Матеріали XLIX науково-технічної

конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. Електрон. текст. дані. 2020. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/allfbtegp-2020/paper/view/9539>.

9. Demchyna, B., L. Vozniuk, and M. Surmai. "Scientific foundations of solving engineering tasks and problems." (2021).

10. Ефективність впровадження енергоощадних заходів в житлово-комунальному господарстві України [Текст] / О. М. Лівінський, В. П. Очеретний, В. П. Ковальський, А. С. Бойко // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2012. Вип. 45. С. 115-119.

11. Юзькова С. П. Аналіз різних видів утеплювачів по термічним та економічним показникам [Електронний ресурс] / С. П. Юзькова, В. П. Очеретний, В. П. Ковальський // Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ, Вінниця, 27-28 квітня 2020 р. Електрон. текст. дані. 2020. Режим доступу: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/9556>.

12. Khodetskyi O. Ash and slag waste utilization in construction [Text] / O. Khodetskyi, V. Kovalsky // Abstracts of XXXII International Scientific and Practical Conference «Science, modern trends and society», Bilbao, Spain, August 14-16, 2023. 2023. P. 8-10.

13. Ковальський В. П. Пінобетон на змішаному вяжучому [Текст] / В. П. Ковальський, І. М. Войтюк, Д. О. Вознюк // Збірник матеріалів Міжнародної науково-технічної конференції "Інноваційні технології в будівництві (2018)", 13-15 листопада 2018 р. Вінниця: ВНТУ, 2018. С. 179-182.

ПРОГНОЗУВАННЯ МІЦНІСНИХ ТА ДЕФОРМАТИВНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ САМОУЩІЛЬНЮВАНИХ БЕТОНІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ

Житковський В.В., Дворкін Л.Й., Кочкарьов Д.В.

(Національний університет водного господарства
та природокористування, м. Рівне)

***Abstract.** The article is dedicated to the development of experimental-statistical models to evaluate the influence of technological factors determining the composition of self-compacting concrete incorporating ground granulated blast furnace slag and a polycarboxylate superplasticizer on compressive and tensile strength, prism strength, modulus of elasticity, and crack resistance. A methodology for designing the composition of self-compacting concrete using the developed models has been proposed, enabling the simultaneous prediction of a set of required parameters.*

***Keywords:** self-compacting concrete, blast furnace slag, superplasticizer, strength, modulus of elasticity, experimental-statistical model, concrete mix design.*

Застосування ефективних пластифікаторів і суперпластифікаторів в складах бетону забезпечило можливість отримання високорухомих (литих) бетонних сумішей і бетону з високими фізико-механічними і експлуатаційними характеристиками на рядових портландцементях і заповнювачах.

Широке застосування самоущільнюваних бетонів (СУБ) у будівництві є досить привабливим, однак обмежується необхідністю використання високоактивних мінеральних добавок та відсутністю достатньої експериментальної бази для прогнозування його властивостей. У свою чергу для закладення СУБ при проектуванні конструкцій необхідні дані щодо деформативності та тріщиностійкості таких бетонів, а також дані щодо впливу їх структурних особливостей, котрі викликані підвищеним вмістом в'язучих, активних мінеральних добавок та суперпластифікаторів на роботу конструкцій та їх довговічність.

Для можливості застосування самоущільнюваних бетонів при проектуванні конструкцій будівель важливим є питання впливу технологічних факторів на деформативні властивості бетону, їх тріщиностійкість та поведінку під навантаженням. Актуальним також є розробка методології прогнозування деформативності самоущільнюваних бетонів на стадії проектування складу бетону.

Для можливості проектування складу СУБ з доменним шлаком з урахуванням комплексу заданих властивостей важливим є отримання математичних залежностей, що дозволяють оцінити вплив технологічних факторів та факторів складу бетону на необхідні властивості.

З метою виявлення комплексного впливу активної мінеральної добавки та суперпластифікатора полікарбоксилатного типу на міцність та деформативні властивості самоущільнюваних бетонів у широкому діапазоні класів за міцністю, а також встановлення математичних залежностей між властивостями та технологічними факторами було проведено планований експеримент.

У якості варійованих факторів були вибрані наступні: витрата портландцементу (Π , кг/м^3 (X_1)), вміст суперпластифікатора (СП, % (X_2)) та витрата мінеральної добавки (доменного гранульованого шлаку) (Ш , кг/м^3 (X_3)). Рухомість бетонної суміші в точках експерименту підтримувалась на рівні Р5 ($\text{ОК}=25\dots27$ см, що відповідає розпливу конуса $560\dots620$ мм (F5 згідно ДСТУ БВ.2.7-176:2008)). З бетонної суміші формували зразки куби $100\times100\times100$ мм (204 зразки) та призми $100\times100\times400$ мм (48 зразків). Визначали кубову та призмову міцність у віці 1, 7, 28 діб (f_{cm} , $f_{\text{prм}}$ МПа) та міцність на розтяг при розколюванні (f_{ctm} , МПа), модуль пружності (E_{cm} (у віці 1, 28 діб).

Механічні характеристики бетону (кубова і призмова міцності) при одноразовому короткочасному навантаженні визначались за стандартними методиками.

При визначенні міцності бетону за зразками-кубами експеримент проводився за трирівневим трифакторним планом V_3 . Дослідження деформаційних характеристик здійснювалось відповідно до дворівневого плану трифакторного плану. Умови планування наведені у табл. 1.

Таблиця 1 – Умови планування експерименту

№	Фактори		Рівні варіювання		
	Натуральні	Код	-1	0	+1
1	Витрата цементу (Π , кг/м^3)	X_1	200	400	600
2	Вміст суперпластифікатора (СП, %)	X_2	0	0,5	0,1
3	Витрата доменного гранульованого шлаку (Ш , кг/м^3)	X_3	0	100	200

При проведенні досліджень було використано наступні матеріали: цемент ПЦ І-500 ПрАТ Волинь цемент філія Дікергоф-Україна, пісок з $M_{кр}=2,0$, гранітний щебінь 5...20 мм, шлак доменний гранульований мелений (Україна) (табл. 3), суперпластифікатор полікарбоксилатного типу РСЕ50 (ТОВ Юейхемикал, Україна). В результаті статистичного аналізу результатів експерименту отримані експериментально-статистичні моделі (ЕСМ) вихідних параметрів, а також кореляційні залежності між окремими вихідними параметрами. Коефіцієнти математичних моделей наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Коефіцієнти ЕСМ вихідних параметрів

	b ₀	b ₁	b ₂	b ₃	b ₁₁	b ₂₂	b ₃₃	b ₁₂	b ₁₃	b ₂₃
ЕСМ отримані за трирівневим планом										
В/Ц	0,30	-0,21	-0,13	0,03	0,13	0,13	0,04	0,01	0	-0,05
f _{cm1}	23,6	11,67	7,71	-3,85	1,98	-8,67	-1,54	6,06	-4,63	-2,53
f _{cm7}	58,5	20,85	19,22	-2,12	-4,01	-10,9	-2,80	10,61	-5,89	1,04
f _{cm28}	74,3	21,51	19,00	-1,79	-6,81	-9,01	-11,5	7,11	-7,34	1,69
f _{ctm1}	2,8	1,34	0,76	-0,34	0,23	-1,01	-0,12	0,63	-0,38	-0,09
f _{ctm28}	6,4	1,76	1,58	0,51	0,21	-1,24	-0,42	0,26	-0,56	0,28
$\frac{f_{cm}}{f_{ctm}}$	11,68	0,72	0,49	-1,20	-1,71	0,51	-1,25	0,61	-0,07	0,40
ЕСМ отримані за дворівневим планом										
f _{pr1}	10,9	7,3	5,2	-0,5	-	-	-	3,9	-0,5	-0,5
f _{pr28}	35,5	13,9	12,2	-0,03	-	-	-	3,5	-9,3	-0,14
E _{cm1}	17119	4340	2525	314	-	-	-	2449	-2534	1080
E _{cm28}	32655	8232	5884	928	-	-	-	3817	-4482	5831

Проведено аналіз впливу досліджуваних факторів на вказані властивості СУБ та встановлено позитивний вплив одночасної дії доменного шлаку та суперпластифікатора на характеристики міцності та деформації.

На основі отриманих даних здійснили апроксимацію залежності між модулем пружності самоущільнюваного бетону з поліфункціональним модифікатором, що містить доменний шлак та суперпластифікатор та призмовою міцністю. Отримані рівняння мають вигляд:

- на 1 добу твердіння:

$$E_{cm1} = 8334 f_{pr1}^{0,34} \quad (8)$$

- на 28 добу твердіння:

$$E_{cm28} = 18319 \ln f_{pr28} - 28342 \quad (9)$$

Середнє значення похибок для розрахунків за отриманими формулами та відомими емпіричними залежностями коливається у досить вузьких межах - 18...35%. Значне коливання похибок, отриманих при розрахунках за кожною окремою формулою дає змогу вважати, що поряд із тісною кореляцією між міцністю та модулем пружності, котра відмічається багатьма авторами, суттєвий вплив на даний показник має якісний складу бетону, а особливо вміст мінеральних і хімічних добавок, котрі модифікують структуру цементного каменю. Очевидно, що використання кореляційних залежностей між міцністю та модулем пружності доцільне лише для орієнтовного встановлення необхідних деформаційних характеристик, наприклад при проектуванні залізобетонних конструкцій.

Для виконання завдань прогнозування властивостей на стадії проектування складу та виготовлення бетону більшу роздільну здатність має метод побудови і використання багатофакторних залежностей, отриманих, наприклад, методом математичного планування експерименту. Отримані експериментально-статистичні моделі, коефіцієнти яких наведені у табл.2, дають можливість прогнозувати комплекс міцнісних та деформативних властивостей при певних значеннях факторів, котрі досліджувались: витрата цементу, доменного шлаку та суперпластифікатора. Використання методів математичної оптимізації та відповідного програмного забезпечення дає можливість знайти значення вище згаданих факторів, які забезпечують необхідні властивості при мінімальній витраті ресурсів.

Висновки:

1. Отримані математичні моделі кубикової та призової міцності, а також модуля пружності у різному віці самоущільнюваних бетонів з органо-мінеральним модифікатором, що включає доменний гранульований шлак та суперпластифікатор полікарбоксилатного типу.

2. Показано позитивний вплив отриманого органо-мінерального модифікатора на деформативні властивості самоущільнюваного бетону.

4. Встановлені кореляційні залежності між механічними характеристиками самоущільнюваного бетону та факторами складу.

5. Запропоновано спосіб проектування складу самоущільнюваного бетону з використанням доменного шлаку та полікарбоксилатного суперпластифікатора, що дозволяє врахувати міцність при стиску та розтягу при розколюванні, призову міцність та модуль пружності і різному віці з використанні отриманих математичних моделей, а також забезпечити мінімальну вартість матеріалу.

ВПЛИВ КІЛЬКОСТІ ПОЛІПРОПЛЕНОВОЇ ФІБРИ І ЛІГНОСУЛЬФОНАТНОГО ПЛАСТИФІКАТОРУ НА В/Ц БЕТОННОЇ СУМІШІ І РАННЮ МІЦНІСТЬ БЕТОНУ

Кровяков С.О., Фіногенов О.І., Ігнатенко А.В.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The influence of the amount of cement, X Mesh fibres and Sika® Plastiment plasticizer on the early strength of concrete and W/C mixtures was investigated. It has been shown that increasing the amount of plasticizer from 0.6 to 0.8% effectively reduces the W/C ratio and increases strength. Fiber has almost no effect on the compressive strength of concrete.*

***Key words:** rigid pavement, polypropylene fiber, plasticizer, W/C ratio, strength.*

Жорсткі цементобетонні покриття автомобільних доріг мають певні переваги перед нежорсткими асфальтобетонними покриттями. Найбільш суттєвими перевагами жорстких покриттів є висока стійкість до утворення колійності та висока довговічність. Це обумовлює все більш широке застосування цементобетонів при будівництві та реконструкції доріг в Україні та в багатьох розвинутих країнах світу [1].

В сучасних умовах при виготовленні бетонів жорстких дорожніх покриттів обов'язково використовуються пластифікатори різного типу [2,3]. При влаштуванні цементобетонних покриттів технологічно передбачається застосування сумішей достатньо низької рухомості (з ОК від 1 до 5 см), що необхідно враховувати при виборі раціонального типу пластифікатору [4]. Також відомим методом підвищення міцності та довговічності бетонів жорстких покриттів є використання дисперсного армування [3,5]. При цьому ефективність такого армування залежить від типу фібри та особливостей складу бетону. В інженерній практиці для пошуку раціональних складів бетонів, в яких може варіюватися вміст декількох компонентів, доцільним є використання методів планування експерименту та експериментально-статистичного (ЕС) моделювання [6,7].

При визначенні впливу кількості поліпропіленової фібри і пластифікатору на В/Ц бетонної суміші і ранню міцність бетону жорсткого дорожнього покриття за оптимальним 15-ти точковим планом був реалізований 3-х факторний експеримент, у якому варіювалися наступні фактори складу:

X_1 – кількість цементу Dycserhoff ПЦ II/A-III 500 P-H, від 300 до 380 кг/м³;

X_2 – кількість поліпропіленової фібри Fiber X Mesh 39 мм (еквівалентний діаметр 0,45 мм), від 0 до 3,0 кг/м³;

X_3 – добавка Sika® Plastiment®-1230 (на базі лігносульфонатів), від 0,6 до 1,0% від маси цементу.

Рухомість всіх сумішей була рівною S1 при ОК від 2 до 3 см, відповідно їх В/Ц залежало від складу. У 15 експериментальних точках були визначені значення В/Ц бетонних сумішей і за цими даними була побудована наведена нижче ЕС-модель впливу варійованих факторів складу (перехід до кодованих значень рівнів факторів виконано за типовою процедурою [7]):

$$\begin{aligned} \text{В/Ц} = & 0,398 - 0,018x_1 \pm 0x_1^2 - 0,003x_1x_2 + 0,007x_1x_3 \\ & + 0,006x_2 + 0,005x_2^2 \pm 0x_2x_3 \\ & - 0,015x_3 + 0,005x_3^2 \end{aligned} \quad (1)$$

За ЕС-моделлю (1) побудовані показані на рис.1 однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на В/Ц в зонах екстремумів, тобто лінії на кожній з діаграм проходять через максимальне та мінімальне значення В/Ц [7].

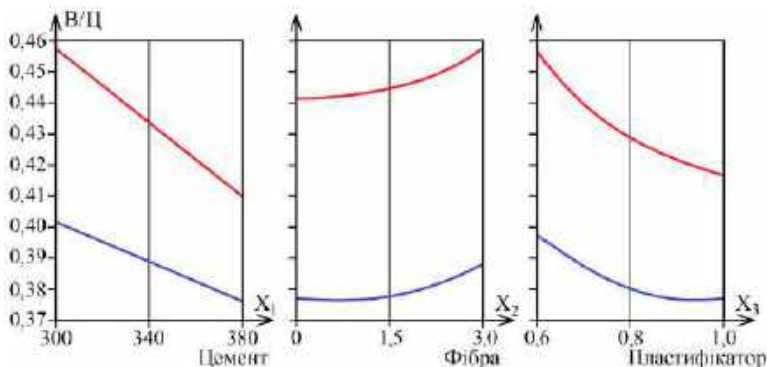


Рис. 1. Вплив варійованих факторів складу бетону жорсткого дорожнього покриття на В/Ц сумішей рівної рухомості в зонах екстремумів

Аналіз ЕС-моделі (1) та діаграм на рис.1 показує, що при збільшенні кількості цементу у складі бетону В/Ц суміші рівної рухомості очікувано зменшується. Введення поліпропіленової фібри у кількості до 1,5 кг/м³ майже не впливає на водопотребу і відповідно В/Ц суміші. При підвищенні кількості фібри до 3 кг/м³ В/Ц суміші рівної рухомості зростає на 4-6%. Підвищення дозування пластифікатора Sika® Plastiment®-1230 з 0,6 до 0,8% від маси цементу відчутно (на 7-9%) знижує В/Ц. При зростанні кількості пластифікатора до 1% В/Ц суміші рівної рухомості додатково знижується, але в меншому ступені. Всього за рахунок підвищення кількості Sika® Plastiment®-1230 з 0,6 до 1% від маси цементу В/Ц суміші знижується на 12-15%.

ЕС-модель, яка відображає вплив варійованих факторів складу на міцність на стиск бетону жорсткого дорожнього покриття у віці 3-х діб має вигляд:

$$f_{cm,3} \text{ (МПа)} = 34,39 + 3,26x_1 - 0,58x_1^2 \pm 0x_1x_2 \pm 0x_1x_3 + 0,35x_2 \pm 0x_2^2 \pm 0x_2x_3 + 0,72x_3 - 0,48x_3^2 \quad (2)$$

За даною ЕС-моделлю були побудовані показані на рис.2 однофакторні діаграми, які відображають вплив варійованих факторів на ранню міцність досліджених бетонів у зонах екстремумів.

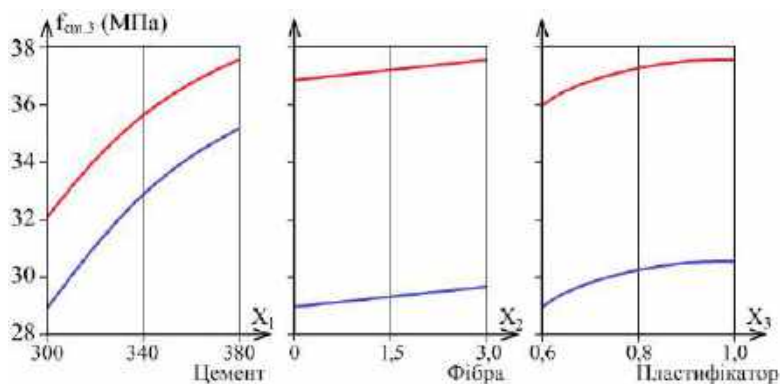


Рис. 2. Вплив варійованих факторів складу на міцність бетону жорсткого дорожнього покриття у віці 3-х діб в зонах екстремумів

Як можна побачити на діаграмах, при підвищенні кількості цементу міцність на стиск бетонів жорсткого дорожнього покриття природно зростає. При цьому це зростання має нелінійний характер і підвищення

кількості в'язучого з 300 до 340 кг/м³ викликає більш суттєву зміну ранньої міцності, ніж підвищення кількості в'язучого з 340 до 380 кг/м³. Введення фібри практично не впливає на величину міцності на стиск досліджених бетонів. Проте основною метою дисперсного армування є підвищення міцності на розтяг при згині та довговічності бетону [3,5]. Раціональною з точки зору ранньої міцності є кількість пластифікатору Sika® Plastiment®-1230 приблизно 0,9% від маси цементу.

В цілому досліджені бетони характеризувалися достатньо високою ранньою міцністю, що дозволяє ефективно використовувати їх для влаштування жорстких дорожніх покриттів. Застосування методів планування експерименту і експериментально-статистичного моделювання дозволило комплексно та з високою точністю проаналізувати вплив варійованих факторів складу на властивості досліджених бетонів та бетонних сумішей.

1. В.М. Нагайчук, Б.С. Радовський. Світовий досвід та сучасні підходи до використання цементобетонного покриття. Дороги і мости. 2020. Вип. 21. С. 188-200. <https://doi.org/10.36100/dorogimosti2020.21.188>.

2. Tahir M.F.M., Abdullah M.M.A.B., Rahim S.Z.A., Mohd Hasan M.R., Sandu A.V., Vizureanu P., Ghazali C.M.R., Kadir A.A. Mechanical and durability analysis of fly ash based geopolymer with various compositions for rigid pavement applications, *Materials*, 2022, 15, 3458. <https://doi.org/10.3390/ma15103458>.

3. Кровяков С.О., Полторапавлов А.О., Мішутін А.В., Заволока М.В. Вплив кількості фібри і суперпластифікатору на міцність бетонів жорстких дорожніх покриттів. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2022, №2, С.60-69 <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2022-2-60-69>

4. Kroviakov S.O., Finohenov O.I. Comparison of the effectiveness of superplasticizers in concretes for rigid pavement. *Сучасне будівництво та архітектура*, 2024, №8, С.65-71. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-8-65-71>

5. Kos Ž., Kroviakov S., Kryzhanovskiy V., Grynova I. Research of strength, frost resistance, abrasion resistance and shrinkage of steel fiber concrete for rigid highways and airfields pavement repair. *Applied Sciences*. Volume 12, Issue 3: 1174. <https://doi.org/10.3390/app12031174> ISSN: 2076-3417

6. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строительном материаловедении. Одеса: Астропринт, 2017. 168 с.

7. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. К.: Вища школа, 1989. 327 с.

КОМБІНАТОРНІ МЕТОДИ ОПТИМІЗАЦІЇ РЕСТАВРАЦІЙНИХ СКЛАДІВ

Семенова С.В., Колесников А.В., Левицький Д.В.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Abstract. *Composite material components are selected according to the operational requirements. The method of discrete optimization is examined for the selection of a qualitative composition of the restoration mixture for the shell rock, and also the implementation of the algorithm for selecting the restoration composition.*

Keywords: *quality composition, discrete optimization, dynamic programming, restoration warehouse.*

Одним із завдань, пов'язаних з стадією проектування будівельних композитних матеріалів, є підбір компонентів композитного матеріалу відповідно до експлуатаційних вимог. Основною вимогою при цьому є вибір найбільш простого складу, що містить найменшу кількість компонентів, які забезпечують достатній рівень експлуатаційних характеристик. Ця комбінаторна задача може бути сформульована на різних рівнях складності і враховувати все більш глибокі уявлення про зміну властивостей композиту в процесі структуроутворення. Початковий рівень складності дозволяє вирішити задану задачу в першому (лінійному) наближенні і здійснити вибір варіантів композиційного складу.

Формалізуємо математичну модель аналізованого вибору, враховуючи, що одне з модельних уявлень має відношення до галузі дискретного лінійного або нелінійного програмування.

Отже, існують експертні оцінки внеску компонентів композитного матеріалу у властивості a_{ij} , де a_{ij} – внесок i -го компонента в j -ту властивість. Компоненти мають як позитивний, так і негативний вплив. Задача полягає в тому, щоб обрати мінімальну кількість компонентів, які забезпечать достатній рівень всіх K експлуатаційних властивостей $T_j (j = 1, \dots, K)$.

Розглянемо задачу у вигляді лінійної системи (1):

$$\sum_{i \in S} a_{ij} x_i \geq T_j, \quad j = 1, \dots, K, \quad (1)$$

де $x_i \in \{0,1\}$ – бінарні змінні, що вказують, чи входить компонент i до складу;

a_{ij} – внесок i -го компонента в j -ту властивість;

b_j – необхідний рівень j -ї властивості;

S – безліч доступних компонентів.

Цільова функція має вигляд (2):

$$\min \sum_{i=1}^N x_i, \quad (2)$$

де N – загальна кількість компонентів.

Завдання такого типу достатньо вивчені та для їх вирішення застосовуються наступні підходи.

Метод відгалуження та границь. Він застосовується для вирішення цієї задачі, оскільки ефективно зменшує простір пошуку, лише перевіряючи потенційно найкращі комбінації. Алгоритм полягає в послідовному виконанні наступних кроків:

1. Побудова дерева рішень, де кожне відгалуження відповідає додаванню компонента ($x_i = 1$) або його виключенню ($x_i = 0$).

2. Обчислення верхньої та нижньої границь для кожного відгалуження (наприклад, шляхом вирішення задачі лінійної релаксації).

3. Відсікання відгалужень, які явно не можуть призвести до оптимального рішення.

4. Ітерація доти, доки не буде знайдено оптимальне рішення.

Цей загальний метод передбачає повну перевірку рішення, можливість обліку додаткових нелінійних критеріїв, проте має експоненційну складність.

Метод релаксації і жадібний алгоритм містить дві складові: реалаксацію та жадібний алгоритм.

Релаксація:

1. Розглядає x_i як неперервні змінні $0 \leq x_i \leq 1$.

2. Вирішується задача лінійного програмування $\min \sum_{i=1}^N x_i$, при тих самих обмеженнях.

3. Отримане x_i округляється ($x_i \rightarrow 0$ або $x_i \rightarrow 1$).

Жадібний алгоритм:

1. Сортуємо компоненти за їх внеском $\sum_{k=1}^K a_{ik} / \|a_{ik}\|$ (чим більший внесок, тим вищий пріоритет).

2. Послідовно додаємо компоненти до виконання всіх обмежень.

Особливості такого алгоритму є можливість швидко і легко його реалізувати, що дає хороші результати для задач зі слабкими кореляційними властивостями. Однак він не завжди здатен знайти оптимальне рішення.

Якщо база даних властивостей і компонентів відносно невелика, ефективним є метод *динамічного програмування*. Він заснований на використанні рівняння Беллмана для дискретних станів. Розглянемо цей метод докладніше.

Нехай $S = \{1, 2, \dots, N\}$ – множина усіх компонентів, $x_i \in \{0, 1\}$ – бінарні змінні, де $x_i = 1$, якщо компонент i включений, a_{ik} – вклад i -го компонента в k -у властивість, T_k – мінімальний необхідний рівень k -ї властивості, K – число властивостей. Визначимо стан як набір рівнів властивостей, які необхідно досягти: $dp[T_1, T_2, \dots, T_K]$ = мінімальна кількість компонентів для досягнення рівнів. Якщо рівень T_k досягається, то він фіксується в поточному стані.

1. Ініціалізація. На початковому етапі:

а) якщо $T_k=0$ для всіх k , то $dp[0, 0, \dots, 0] = 0$ (нульові властивості досягаються без компонентів).

б) для всіх інших значень $dp[T_1, T_2, \dots, T_K] = \infty$ (недосяжно в початковому стані).

2. Рекурсивне співвідношення. При додаванні i -го компонента має вигляд (3):

$$dp[T_1, T_2, \dots, T_K] = \min \left(1 + dp[T_1 - a_{i1}, T_2 - a_{i2}, \dots, T_K - a_{iK}] \right), \quad (3)$$

де $(T_k - a_{ik})$ – оновлені рівні властивостей після включення i -го компонента;

1 додається, оскільки він включає i -й компонент.

3. Ітеративне оновлення. Для кожного компонента i та кожного набору поточних рівнів T_k :

а) перебираються всі стани $dp[T_1, T_2, \dots, T_K]$, які можуть бути покращені додаванням компонента i .

б) оновлюється таблиця значень dp , використовуючи рекурентне співвідношення.

4. Відновлення рішення. Після заповнення таблиці:

а) якщо $dp[T_1, T_2, \dots, T_K] \neq \infty$, тоді задача досяжна, і мінімальна кількість компонентів записується в цій комірці.

б) Для відновлення набору x_i :

– починаємо з $dp[T_1, T_2, \dots, T_K]$

– зворотнім ходом відстежуємо, які компоненти i були додані з кожним кроком, поки не повернемося до початкового стану $dp[0, 0, \dots, 0] = 0$.

5. Перевірка обмежень.

а) якщо $dp[T_1, T_2, \dots, T_K] = \infty$, тоді задані властивості недосяжні з цим набором компонентів.

б) якщо результат досяжний, перевіряємо остаточний склад на виконання додаткових умов, таких як економічність або екологічність.

Розглянемо реалізацію цього алгоритму для вибору реставраційного складу. Для реставраційного складу (наприклад, адгезуючого до черепашника) потрібно вибрати мінімальний набір компонентів з наявних, забезпечивши відповідність вимогам експлуатаційних властивостей (за умовною 5-бальною шкалою):

1. Міцність $S1$: не менше 4 балів.
2. Адгезія $S2$: не менше 5 балів.
3. Паропроникність $S3$: не менше 3 балів.
4. Сумісність з основою $S4$: не менше 4 балів.

Як вихідний набір компонентів використовується вапно, глина, мелена кераміка, обпалена глина, пісок, мікросилікон, цемент, волокно, шкарлупа. В таблиці 1 наведено наступні експертні оцінки властивостей компонентів у композиті.

Таблиця 1 – Умовні вклади компонентів композиту у властивості

Компонент	Міцність $S1$	Адгезія $S2$	Паропроникність $S3$	Сумісність з основою $S4$
Вапно	3	2	5	4
Глина	-2	3	4	3
Подрібнена кераміка	2	2	-1	2
Обпалена глина	4	4	-2	2
Пісок	1	-1	3	-1
Мікрокремнезем	3	3	-3	1
Цемент	5	2	4	-3
Фібра	2	1	-2	2
Подрібнений черепашник	-2	4	4	5

Рекурентне співвідношення, що застосовується (4):

$$dp[T_1, T_2, T_3, T_4] = \min(dp[T_1, T_2, T_3, T_4, 1] + dp[T_1', T_2', T_3', T_4']), \quad (4)$$

де $T_j' = \max(0, T_j - a_{ij})$,

Покрокове застосування розглянутого вище алгоритму відображено в таблиці 2, разом із поясненнями з боку матеріалознавства.

Таким чином досягаються цільові показники $dp[4,5,3,4] = 3$, мінімальна кількість компонентів. Склад суміші: вапно, обпалена глина, пісок. Розподіл функцій компонентів: вапно – основне покращення

паропроникності та помірне зміцнення, обпалена глина – забезпечує необхідну міцність і адгезію, пісок – стабілізує структуру і додає до паропроникності.

Таблиця 2 – Результати покрокової оптимізації складу

Крок	Доданий компонент	Стан до додавання $dp[T_1, T_2, T_3, T_4]$	Рекурентне співвідношення	Стан після додавання	Опис кроку
1	Вапно	$dp[0,0,0,0] = 0$	$dp[3,2,5,4] = \min(dp[3,2,5,4], 1) + dp[0,0,0,0]$	$dp[3,2,5,4] = 1$	Вапно покращує міцність до 3, адгезію до 2, паропроникність до 5, сумісність з основою до 4.
2	Обпалена глина	$dp[3,2,5,4] = 1$	$dp[4,4,3,2] = \min(dp[4,4,3,2], 1) + dp[3,2,5,4]$ де $T_2' = \max(0, 2 - 4)$, аналогічно для інших властивостей.	$dp[4,4,3,4] = 2$	Обпалена глина доводить міцність до 4, адгезію до 4, але трохи знижує паропроникність.
3	Пісок	$dp[4,4,3,4] = 2$	$dp[4,4,3,4] = \min(dp[4,4,3,4], 1) + dp[4,4,3,4]$ тут зміни незначні, оскільки властивості вже відповідають вимогам.	$dp[4,5,3,4] = 3$	Пісок підвищує паропроникність і завершує формування складу з мінімальною кількістю компонентів.

Наведений алгоритм пропонується для застосування до баз даних компонентів композиційних матеріалів різної природи. Слід зазначити можливість оцінки балів попарної та більш складної взаємодії компонентів. Такий доволі складний підхід є більш виправданим з точки зору теорії структуроутворення, бо цей процес істотно залучає границі розділу частинок компонентів матеріалів.

ДІАГНОСТИКА КОРОЗІЙНИХ ПОШКОДЖЕНЬ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ МЕТАЛЕВИХ КОНСТРУКЦІЙ

Чучмай О.М.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

Abstract. the diagnosis of corrosion damage and prediction of the durability of metal structures is considered.

Keywords: diagnostics, durability, corrosion, damage, metal structures

В нинішній час багато конструкцій виконують із металевого профіля – опори ліній електропередачі, башти мобільного та інтернет зв'язку і т. д.. В зв'язку з цим необхідно розробляти кількісні критерії оцінки довговічності металевих конструкцій.

Проблема забезпечення надійності будівельних конструкцій на стадії проектування, будівництва та експлуатації будівель та споруд, останнім часом стає однією з найважливіших проблем в Україні та інших провідних країнах світу. Питання оцінки залишкової несучої здатності та надійності елементів металевих конструкцій виник давно і інтенсивно наростає у зв'язку з фізичним та моральним зносом будівель та споруд.

З часом несуча здатність, надійність і залишковий ресурс металевих конструкцій знижуються внаслідок накопичення пошкоджень або появи та розвитку дефектів. Для попередження аварій та руйнувань конструкцій, для продовження часу їх експлуатації необхідно володіти інформацією про рівень їхньої залишкової несучої здатності, надійності та залишкового ресурсу.

Показники довговічності повинні враховувати випадкову природу силових та кліматичних впливів, та ґрунтуватися на досвіді експлуатації металевих конструкцій.

Для розробки концепції проектування необхідно виконувати роботи по вивченню металевих будівельних конструкцій. На зазначені вище металеві конструкції окрім силових навантажень обумовлених вітром,

ожеледицею, власною вагою впливає і зовнішнє середовище. Цей вплив проявляється в корозійному руйнуванні металевих елементів конструкції.

Методи дослідження атмосферної корозії ділять на три групи:

1. Лабораторні дослідження – проводять, як правило, із зразками невеликих розмірів, умови дослідів заздалегідь відомі та строго контролюються. Використовується штучне пришвидшення корозійних процесів шляхом посилення агресивних впливів.

2. Натурні дослідження – проводять на зразках в природних умовах на спеціально обладнаних корозійних станціях. Встановлено, що основним фактором корозійної агресивності незабрудненої атмосфері є час знаходження вологої плівки на поверхні металу. Необхідно відмітити, що продукти атмосферної корозії працюють як захисна плівка, зменшуючи швидкість корозії з часом.

3. Експлуатаційні дослідження – проводять шляхом спостереження за елементами конструкцій в умовах їх фактичної роботи.

Очевидно, що якщо при проектуванні використовувати дані про корозійні втрати конструкцій, які експлуатуються довгий час, то прогноз швидкості корозії за цими даними буде найбільш достовірним, а проектні рішення будуть близькими до оптимальних.

Натурне обстеження стану металевих конструкцій складається з збору даних про фактичні умови в яких працює конструкція, порівняння цих умов з передбаченими проектом, інструментальне вимірювання корозійних втрат, фотофіксація та опис дефектів на момент обстеження.

Ділянки для обстеження конструкцій вибирають на основі вивчення виконавчої технічної документації. Найбільшу цінність для отримання інформації дають демонтовані конструкції з великим строком експлуатації.

Прогнозування можливе на основі апроксимації результатів контролю корозійних втрат степеневою функцією виду:

$$K(T) = \alpha T^n$$

де, α та n - емпіричні коефіцієнти отримані на основі апроксимації результатів контролю корозійних втрат; T – строк служби конструкції, значення якого приймається рівним: для незахищеної конструкції – проміжку часу від початку будівництва до кінця запланованої експлуатації; для конструкцій з захисним покриттям – проміжок часу від моменту вичерпання захисних властивостей покриття до запланованого строку експлуатації.

Точність результатів визначення числових значень підвищується з збільшенням кількості вимірювань при використанні даних про

корозійні втрати конструкцій які експлуатуються в конкретному районі максимально довгий час.

Визначення нормативної надійності – це технічно-економічна проблема. Мінімальна вага не являється ознакою оптимальної конструкції. Оптимальною можна вважати конструкцію, показники довговічності елементів якої близькі між собою.

Використовуючи запропонований метод прогнозування довговічності елементів металевих конструкцій можна досягти того щоб показники довговічності елементів були близькі між собою.

1. ДБН В.1.2-14-2009. Общие принципы обеспечения надёжности и конструктивной безопасности зданий, сооружений, строительных конструкций и оснований

2. ГОСТ 27.002-89 Надёжность в технике. Основные понятия. Термины и определения.

3. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надёжности и безопасности строительных конструкций. М.: Издательство Ассоциации строительных вузов 254с.

3. Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник/ В.В. Клюев, Ф.Р. Сосин, А.В. Ковалёв и др. Под ред. В.В. Клюева. 3-е изд., испр. и доп. М.: Машиностроение, 2005. 656с., ил.

4. Ржаницын А.Р. Теория расчёта строительных конструкций на надёжность. М.: Стройиздат, 1978. 239с.

MODELING AND OPTIMIZATION OF CARBONIZATION HARDENING OF LIGHTWEIGHT CONCRETE

Gara O.A., Gara An.O., Kolesnikov A.V.

(Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

***Abstract.** The paper examines the data obtained during the study of accelerated carbonization hardening of expanded clay concrete. The mechanisms and methods of carbonization hardening, the influence of recipe and technological factors on strength characteristics are considered. The most significant of them were the consumption of the binder, the relative amount and granulometry of the filler (ground limestone) and aggregate (keramzite), the concentration of the plasticizing additive (SYM) and the technological parameters of carbonization – the maximum pressure and time of carbonization. The nature of the influence of the relevant properties on the strength characteristics is considered. The results of the planned and implemented experiment were studied using the methodology of response surfaces. Experimental-statistical models of compressive strength were built for 1 hour, 28 days and 180 days from the end of the carbonation procedure. The degrees of influence of various factors are determined*

***Keywords:** accelerated carbonization hardening, experimental planning, optimality according to the combined criterion, desirability function.*

Accelerated carbonation hardening (ACH) is a promising solution to the problems of increasing the durability and strength of concrete structures. Traditional methods of curing concrete, such as steam curing or the use of chemical additives, often require long curing periods and may have environmental or economic disadvantages. Thus, more than 10 million tons of conventional fuel, including more than 3 billion cubic meters of gas, are spent annually on heat treatment in the European Union. The coefficient of use of heat and fuel due to the imperfection of the technological process is 5...11%. In contrast, accelerated carbonisation offers a sustainable and effective approach to improving the properties of concrete. Its application has a significant ecological component related to the fixation of atmospheric carbon dioxide CO₂. ACH technology is associated with the injection of CO₂,

which reacts with non-hydrated components of the cement composite, which leads to the transformation of absorbed CO_2 into various forms of stable carbonates. This method is better than natural or weathered carbonation, because the natural diffusion of atmospheric CO_2 through the pores of concrete or mortar occurs very slowly. ACH technology accelerates the rate of carbonization and increases the net amount of sequestered CO_2 . In addition, ACH process conditions can be adjusted in a controlled environment (usually in a carbonization chamber). Thus, the main task of promoting ACH concrete as a carbon sequestration strategy is to ensure conditions under which carbonation does not impair mechanical strength, as well as other operational properties.

Accelerated carbonation hardening in cement involves the diffusion of carbon dioxide (CO_2) into the porous concrete matrix, where moisture facilitates its transport. Upon contact, CO_2 reacts with calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) to form calcium carbonate (CaCO_3), reducing porosity and increasing strength through the deposition of carbonate crystals. This reaction is accompanied by the progression of a carbonate front, influenced by factors such as CO_2 concentration, humidity, and pore structure. Additionally, carbonation compacts the microstructure, enhances mechanical properties, and decreases permeability. However, the process reduces the alkalinity and pH of the matrix, which may affect the corrosion resistance of steel reinforcement, though protective carbonate layers can mitigate this. These mechanisms contribute to improved durability, strength, and environmental sustainability by capturing CO_2 .

The system under consideration is inherently complex, encompassing numerous processes such as heterogeneous chemical reactions, carbon dioxide transport within a capillary-porous dispersed medium, crystallization, and dissolution. Directly studying such a system would necessitate simultaneous accounting for the entire spectrum of phenomena associated with carbonation hardening, including their intricate interactions. An alternative approach lies in ES-modeling, which focuses on capturing only the most significant systemic relationships while treating secondary interactions in a simplified manner or disregarding them entirely. This methodology enables the reduction of model complexity by employing techniques such as backward elimination to systematically exclude insignificant terms in ES-models. This simplification retains the essential features of the system while making the analysis and interpretation of results more feasible and practical.

In order to build mathematical models that reflect the influence of the basic factors on the strength of carbonized lightweight aggregate concrete in the design terms of the tests, a five-factor plan of the second order of the

"Hartley - 5" type with six points in the center of the plan was implemented. The factors and their levels of variation are given in the table 1. In the experiment, lightweight aggregate concrete of the optimal fractional composition, determined for the conditions of carbonization hardening, were used. The matrix of planning and consumption of lightweight aggregate concrete mixture components is presented in.

Table 1 – Factors and their levels of variation

Factors		Unit measurement	Code	Levels of variation		
				-1	0	+1
A	Binder consumption	kg/m ³	Knitt	300	400	500
B	Contents of the SYM additive	%	SYM	0	0.2	0.4
C	The content of ground limestone binder	%	GL	0	15	30
D	The amount of carbonation pressure	MPa	PCO2	0.6	0.9	1,2
E	The duration of the carbonization process	min	tCO2	30	45	60

The research was carried out on cube samples with the size of an edge 10 cm. Molded samples were subjected to carbonization according to the appropriate modes. When testing the samples, the density of concrete, the consumption of carbon dioxide for the carbonation of the samples (according to the change in the weight of the samples before and after carbonization), and the compressive strength of the samples were determined during the control periods of the tests.

Study of compressive strength R_c (MPa) of the material after carbonation 1 hour (R1h), 28 days (R28) and 180 days (R180) led to the following results (table 2). The value of concrete strength in the experiment varies from 2.1 to 16.5 MPa 1 hour after carbonization, from 4.6 to 21.8 MPa at the age of 28 days and from 5.9 to 26.1 MPa at the age of 180 days. The obtained data made it possible to build EC models of the properties of the composite material, for which the Design Expert package was used. One of the useful features of this program is the ability to download "historical" data, that is, data obtained according to an experiment plan built and implemented previously outside of this package. The response surface methodology was used in data analysis. The type of obtained models, as well as some of their

statistical characteristics, are shown in Table 2. The selection of statistically significant components was carried out at $\alpha = 0,1$ by splitting in the reverse order (Backward elimination).

Table 2 – EC strength models of material characteristics and their statistical characteristics

R1h, MPa	R28, MPa	R180, MPa
R1h = +8.80 +3.70 * A +0.90 * B -0.50 * C +1.30 * D +0.50 * E +0.40 * A * B +0.20 * A * D +0.20 * A * E +0.40 * B * C -0.100 * B * D +0.10 * B * E -0.30 * C * D -0.30 * C * E +0.20 * D * E +0.98 * A ² -0.52 * C ² -0.52 * D ² -0.32 * E ²	R28 = +12.69 +5.88 * A +1.12 * B -1.22 * C -0.22 * D +0.12 * E +0.47 * A * B -0.28 * A * C -0.18 * A * D +0.47 * B * C -0.13 * B * D +0.27 * D * E +1.36 * A ² -0.44 * B ² -0.64 * C ² -0.54 * E ²	R180 = +13.87 +6.80 * A +1.10 * B -1.30 * C -0.40 * D +0.10 * E +0.30 * A * B -0.50 * A * C -0.20 * A * D -0.30 * A * E +0.30 * B * C +0.30 * B * D +2.13 * A ² -0.97 * B ²
R-squared =0.9983 Adj R-squared =0.996 Preq R-squared =0.99 Adeq Precision 93.028	R-squared= 0.9984 Adj R-squared= 0.997 Preq R-squared=0.993 Adeq Precision 90.276	R-squared=0.9985 Adj R-squared=0.9973 Preq R-squared=0.9922 Adeq Precision 106.701

Interpretation of the role of factors in the formation of the strength of characteristics. The change in the degree of influence of the consumption of binder A by 3.2 MPa 1 hour after carbonization is a consequence of the change in the levels of factors B, D and E. At this age, the maximum increase in the strength of lightweight aggregate concrete is observed at the maximum content of the SYM additive (SYM, B) and the maximum values of parameters characterizing the carbonation regime. In contrast, at the age of 28 and 180 days, the maximum increase in strength occurs with the maximum content of SYM additive, with the use of a binder without ground limestone rock and with minimum values of pressure and carbonation time. The dependence of the strength of carbonized expanded clay concrete on the

consumption of the binder is described by a function of the second order. With an increase in the consumption of the binder, the degree of influence of the factor increases. Thus, when the binder consumption is increased from 300 to 400 and from 400 to 500 kg/m³, the strength of concrete increases on average by 2.7 and 4.7 MPa one hour after carbonization, by 4.2 and 7.2 MPa at the age of 28 days and at 4.5 and 9.5 MPa at the age of 180 days.

The second most influential prescription factor is the factor (GL, C) – percentage content in binding ground limestone. This factor is ambiguous in terms of its influence. At the age of one hour after carbonation, a change in the nature of exposure causes a change in the content of SYM and the amount of pressure and time of carbonation. Thus, in the absence of SYM additive and at the maximum values of pressure and carbonation time, an increase in the binder content of ground limestone leads to a decrease in strength by 3.0 MPa. With the content of SYM in the amount of 0.4% of the weight of the binder and at the minimum values of pressure and carbonation time, increasing the content of the binder of ground limestone rock from 0 to 30% leads to an increase in strength by 1.0 MPa.

With the increase in the age of concrete, the change in carbonation regimes has practically no effect on the degree and nature of the influence of the content of binding ground limestone on the strength of concrete. In this case, the consumption of the binder and the content of the SYM additive have a significant effect. Thus, with a binder consumption of 500 kg/m³ and the absence of SYM additive in the concrete mixture, the change in the content of ground limestone in the studied interval leads to a decrease in strength by 4.0 MPa at the age of 28 days and by 4.1 MPa at aged 180 days. With a binder consumption of 300 kg/m³ and the content of the SYM additive in the amount of 0.4% of the weight of the binder, replacing up to 30% of cement with ground limestone has practically no effect on the strength of concrete at the age of 28 and 180 days after carbonization.

The obvious goal of creating a composite material is to achieve maximum strength during the entire long-term hardening process of 180 days. But strength in the regulatory control period of 28 days is also important. To achieve appropriate results, other restrictions and requirements (except, of course, fixed interval restrictions) are removed. The appropriate conditions allow us to construct partial optimization criteria and determine the distribution of degrees of importance for the desirability function (table 3).

Table 3 – Parameters of the desirability function for optimization of long-term hardening

Factors and properties	Objectives	Lower limit	Upper border	Lower weight	Upper weight	Importance
R1h	max	2.1	16.5	1	1	2
R28	max	3.8	21.8	1	1	2
R180	max	5.9	26.1	1	1	5

The desirability function as a convolution criterion was optimized, and the following solutions were obtained in coded values (Table 4).

Table 4 – Results of optimization of long-term hardening

No	Knitt	SYM	GL	PCO2	tCO2	R1h	R28	R180
1	1	0.89	-1	0.08	0.52	14.88	21.21	24.63
2	1	0.93	-0.99	0.06	0.51	14.87	21,23	24.60
3	1	0.99	-0.98	0	0.54	14.84	21.25	24.60
4	1	0.98	-1	-0.17	0.23	14.25	21.48	24.84

The first of them is the most profitable, it should be accepted.

Conclusions. The study of the strength data of expanded clay concrete of carbonization hardening made it possible to build ES-models of the strength characteristics of the material. The experimental strength values range from 2.1 to 16.5 MPa 1 hour after carbonization, from 4.6 to 21.8 MPa at the age of 28 days, and from 5.9 to 26.1 MPa at the age of 180 days. Models are graphically displayed and interpreted. . In connection with the defined tasks, the parameters of the desirability function were determined, optimization was carried out and optimal sets of recipe-technological factors were obtained.

MODELING THE WATER RESISTANCE OF GYPSUM-CONTAINING COMPOSITIONS

Kersh V.Ya., Khlytsov N.V., Tihoniuk S.A.

(Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

***Abstract.** The results of investigation of water resistance of plaster mixture on gypsum-containing binder, intended for repair of limestone buildings, using two criteria - softening coefficient and water resistance index, are presented.*

***Keywords:** gypsum-containing composite, water resistance, softening coefficient, water resistance index, mathematical modeling.*

Most of the buildings in the historic center of Odesa are made of local natural stone - limestone shell rock. The disadvantage of shell rock is a significant loss of strength when it is moistened, which leads to a decrease in the bearing capacity of the structure up to its complete loss. Among the factors that lead to the soaking of exterior walls is damage or the absence of a plaster layer on the exterior surfaces of the walls. Attempts to repair shell rock walls with conventional cement-sand compositions lead to accelerated structural destruction for a number of reasons: greater strength of the plaster compared to the main layer; different deformation properties and, finally, lower vapor permeability of the plaster layer, which prevents steam from leaving the structure.

To restore shell rock buildings, special restoration compounds must be used whose properties are consistent with the properties of the main wall material. The following can be considered important criteria for assessing the suitability of a plaster mix for this purpose: compatibility with the main wall material, water resistance, strength, vapor permeability, adhesion, deformation characteristics, and hardening rate.

Based on these requirements, the repair mixture is made on a gypsum-cement-pozzolanic composition based on G5 gypsum and cement (ground clinker) with the addition of fly ash as a pozzolanic component. Slaked lime was added to the initial mixture to possibly increase plasticity and water resistance. In the planned 3-factor experiment B₃, the mass content of the

components as a percentage of a fixed amount of gypsum was varied. The main factors and their variation levels are given in Table 1.

Table 1 – Main factors and their levels of variation

Factor number i	Factors	Levels of variation		
		X _i = -1	X _i = 0	X _i = +1
1	Amount of cement (C, mass parts per 100 parts of gypsum)	40	50	60
2	Amount of lime (I, mass parts per 100 parts of gypsum)	40	50	60
3	Quantity (3, mass parts per 100 parts of gypsum)	20	40	60

The water-solid ratio, selected according to the normal density of the mixture, is 0.6. The samples are made in the form of standard beams measuring 40x40x160 mm.

This paper examines the results of a study of the water resistance of gypsum-containing plaster mixtures.

The resistance of building materials and products to water is usually assessed by the softening coefficient SC – this is the ratio of the strength of the material saturated with water to its strength in a dry state – $SC = R_{vet}/R_{dry}$. If the softening coefficient is more than 0.8, the material is considered water-resistant. The softening coefficient of building gypsum fluctuates between 0.3 and 0.45. Determining the softening coefficient of gypsum-containing materials depends on the conditions under which the measurements are taken.

The softening coefficient, in principle, ambiguously reflects the actual water resistance of the material. Its value depends on the ratio of strengths in water-saturated and dry states, and in some cases, materials with lower strength may have a higher SC than materials with higher strength. A more correct criterion, in our opinion, may be the water resistance index I_B , in which the role of the material strength in a water-saturated state is “enhanced” – $I_w = R^2_{vet}/R_{dry}$, as more significant in design.

Water resistance was determined after 2 hours and after 48 hours of soaking the samples. The decrease in strength in the latter case compared to a two-hour soak was on average 30 percent. However, the minimum strength of the samples after 48 hours of soaking was within 2.5÷4.5 MPa, which exceeds the strength of shell limestones even in a naturally wet state. The strength of dried samples after 7 days of hardening was taken as the strength in a dry state.

The influence of the content of components – cement (factor X1), lime (X2) and ash (X3) on the water resistance of the mixture was studied using mathematical modeling. As an example, significant coefficients of some models Rvet, SC and Iw at different hardening and moistening times are given in Table 2.

Table 2 – Coefficients of models Rvet, SC and Iw after 7 days (d) of hardening and 2 and 48 hours (h) of humidification

Measurement conditions 2h/7d		
Rvet	SC	Iw
1. $b_0 = 3.564$	1. $b_0 = 0.673$	1. $b_0 = 2.549$
2. $b_1 = 0.414$	2. $b_1 = 0.026$	2. $b_1 = 0.381$
3. $b_2 = -0.510$	3. $b_{23} = 0.022$	3. $b_2 = -0.308$
4. $b_{23} = -0.178$	4. $b_3 = 0.060$	4. $b_3 = 0.215$
5. $b_{12} = -0.298$		5. $b_{13} = 0.156$
6. $b_{13} = 0.138$		6. $b_{12} = -0.269$
7. $b_{33} = 0.322$		
Measurement conditions 48h/7d		
Rvet	SC	Iw
1. $b_0 = 2.496$	1. $b_0 = 0.489$	1. $b_0 = 1.190$
2. $b_1 = 0.559$	2. $b_1 = 0.063$	2. $b_1 = 0.481$
3. $b_2 = -0.369$	3. $b_2 = 0.017$	3. $b_2 = -0.198$
4. $b_{33} = 0.583$	4. $b_3 = 0.043$	4. $b_3 = 0.169$
5. $b_{23} = -0.239$	5. $b_{12} = -0.020$	5. $b_{12} = -0.293$
6. $b_{12} = -0.361$	6. $b_{22} = -0.034$	6. $b_{23} = -0.143$
	7. $b_{33} = 0.076$	7. $b_{33} = 0.485$

The conducted regression analysis of the models showed that the softening coefficient ambiguously evaluates the role of the mixture components, such as lime, in ensuring the water resistance of the material. In the 2-hour moistening model SC 2h/7d (Table 2), there is no linear coefficient b_2 at X2 (lime), there are only linear effects of cement and ash, and there is also an insignificant effect of the interaction of lime and ash. At the same time, the role of ash is clearly exaggerated (coefficient b_3 is the highest), although it is known that it is cement that imparts water-resistant properties to the material.

The highest calculated value of Sc 2h/7d occurs at the maximum level (in the studied factor space) of lime content. The SC 48h/7d model (Table 2) has an insignificant positive linear effect of lime (b_2) and negative effects - quadratic (b_{22}) and interaction of lime with cement (b_{12}). The highest level

of water resistance is ensured at an average level of lime content. At the same time, the models of compressive strength of wet samples R_{wet} after soaking show that, regardless of the soaking period, the most water-resistant samples are those containing the minimum amount of lime (Table 2).

As an example, Fig. 1 shows isosurfaces of the water resistance index values calculated using mathematical modeling based on the results of strength measurements of samples in dry and wet conditions that hardened for 7 days after being soaked for 2 and 48 hours.

The softening coefficient, as a more familiar criterion, was also calculated; for some samples under the same measurement conditions, it approaches 0,8.

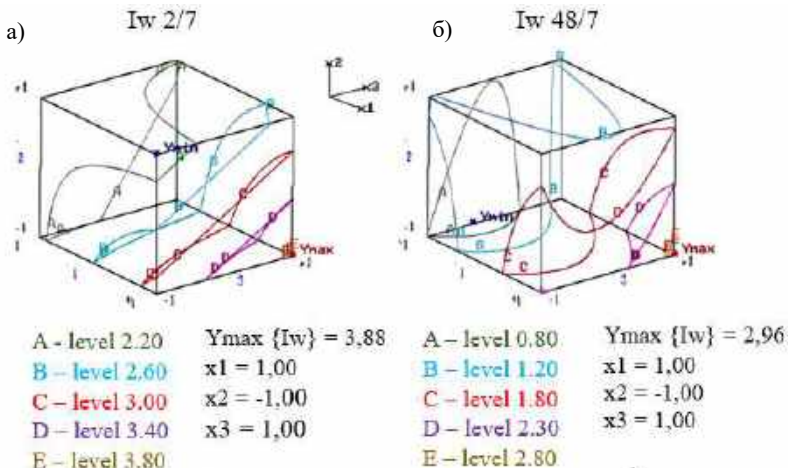


Fig. 1. Isosurfaces of water resistance index I_w after hardening of samples for 7 days and moistening: a – 2 hours, b – 48 hours

Analyzing the I_w models and their graphical representations, we can conclude that the cement content (the highest in the studied range) and, to a lesser extent, ash content have a positive effect on the water resistance of the repair composition on the AGC binder. Increasing the lime content in the studied range reduces the resistance of the plaster composition to water at an early age.

Thus, the assumption about the usefulness of adding lime to increase the water resistance of the gypsum-cement mixture was not justified. Considering also that lime neutralizes the effect of the pozzolanic additive, and the introduction of each additional component also complicates the technology of manufacturing the material, a decision was made to exclude lime from the composition of the experimental mixture in subsequent studies.

RICE HUSK ASH - FILLER IN CEMENT FOR FINE-GRAINED CONCRETE

Makhavat Dzhusupova, Aidai Talantbek Kyzy

(Kyrgyz State Technical University Named After I. Razzakov,
Bishkek, Kyrgyz Republic)

Abstract: *The article presents the results of research on the use of rice husk ash in amorphous form with SiO₂ - 81.3 % as a pozzolanic additive in cement. At modification by organic-mineral additives it is possible to receive strong and durable fine-grained concrete of classes B20 ... B22.5.*

Keywords: *rice husk ash, cement, aggregate, microstructure, fine-grained concrete.*

In accordance with modern quality standards for building materials, special attention should be paid to the environmental sustainability and economic efficiency of scientific developments. Scientists consider any possibility of replacing natural resources with man-made raw materials. Partial replacement of cement with cheap fillers, such as rice husk ash (RHA) will allow without loss of basic properties of binder and concrete to increase technical and economic performance and solve environmental problems.

About 100 million tons of rice husk by-products are produced worldwide, which are often disposed of in nonenvironmental ways: incineration or landfilling.

RHA consists mainly of silica SiO₂, has a very low bulk density of 90 to 150 kg/m³, has good reactivity and can be effectively used as pozzolanic filler for cements and concretes [1, 2, 3].

The works [4, 5] show the possibility of obtaining modified concrete with the required performance characteristics through the joint use of organic-mineral additives-modifiers of cement and concrete structure. During cement hardening, containing amorphous silica RHA forms additionally low-basic calcium hydrosilicates of CSH type, compacting the concrete structure. Such concretes have increased frost resistance, water resistance and resistance to chemical influences. Studies have shown that rice husk ash, when added to cement, increases the strength of concrete by 32% at the age of 28 days and water resistance by one or two grades.

Due to the availability and low cost of raw materials, RHA can be a cheap alternative to imported microsilica. This will reduce the consumption of cement in concrete mix without loss of strength and allow for more environmentally friendly construction.

The purpose of this research: to study the possibility of modification of fine-grained concrete with fine silica additive in the form of rice husk ash from the southern region of the Kyrgyz Republic.

The fine-grained concrete specimens were used for the manufacture of the samples: Portland cement - M400 D20 GOST 10178-85, 30515-97, NG-26.25; compressive strength of 28 days of hardening - 36.6 MPa; density ρ - 3.1 g/m³. Sand - coarseness modulus M_k = 3.38. Rice husk ash, chemical composition: %: SiO₂ - 81.3; Al₂O₃ - 4; CaO - 5; Na₂O - 1.5; MgO - 3; Fe₂O₃ - 4; K₂O - 1.2. Superplasticizer - Neolit 303, pH 3.5 - 5.5 of the solution, density 1120 ± 30 kg/m³. For this research, the structure of rice husk ash was previously studied using a VEGA3 TESCAN scanning electron microscope (Fig. 1a, b).

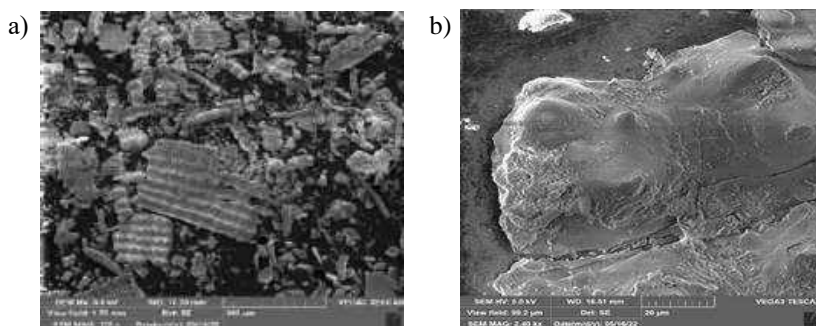


Fig.1: Microstructure of rice husk ash (a) at magnification ($\times 133$) and (b) at magnification ($\times 2400$)

The microstructure of rice husk ash (RHA) particles is unique due to the content of amorphous silica. It can be seen that the rice husk ash consists of chaotically scattered small porous particles of irregular shape. At low magnification ($\times 133$), a porous surface with microcracks and small granular particles can be seen (Fig.1a). At high magnification ($\times 2400$) (Figure 1b), the microstructure of rice husk ash (RHA) particles is represented by amorphous silica and has a porous structure. At this magnification level, amorphous (disordered) areas of silica are visible and do not have a clear geometric shape, which confirms the absence of crystalline structure. The RHA particles consist of multiple agglomerates of silica nanoparticles, often ranging in size from several tens to hundreds of nanometers.

When RHA is used in cement, strength is increased due to its unique properties. The porous structure of RHA provides increased adsorption properties, which reduces water and increases the strength of the cement stone. RHA introduces positive changes in the microstructure of the cement matrix. Prepared RHA in amorphous form as well as coal combustion ash when added to cement promotes the increase of concrete compressive strength at the age of 28 days by 32 % and water resistance by one or two grades [1, 2, 3].

In these studies, the active fine admixture used for the modification of FGC as an active fine admixture was RHA from the southern region of Kyrgyzstan. In order to reduce water consumption, it is necessary to use water-reducing additives, which will affect the strength properties of concrete.

To evaluate the effectiveness of using rice husk ash in concrete, a 2-factor experiment was conducted. Variable factors: rice husk ash $-X_1 = 4 \pm 4\%$ and $X_2 = 0.4 \pm 0.4\%$ - Neolit 303 additive (relative to the amount of cement M400 D20). The rest is cement.

The following parameters were selected as output parameters: f_{ctk} and $f_{ck.cube}$ compressive and flexural strength after 7, 28 and 90 days of curing, density ρ 28 day, water-cement ratio B/C, degradation factor K_d .

Mathematical models (Table 1) and their graphical images of fine-grained concrete (FGC) properties were obtained based on the experimental results (Fig. 1 - 4).

Table 1 – Coefficients of models of the main properties of fine-grained concrete

№	Properties of FGC	1	2	3	4	5	6
		b_0	b_1	b_{11}	b_2	b_{22}	b_{12}
1	f_{ctk}^7	10.95	-2.04	2.21	-1.2	-1.88	0.37
2	f_{ctk}^{28}	14.09	-1.94	0.69	-1.67	0.05	1.0
3	f_{ctk}^{90}	21.97	0.28	0.86	0.85	0.00	0.02
4	$f_{ck.cube}^7$	15.4	-1.5	2.37	-1.3	-0.63	0.26
5	$f_{ck.cube}^{28}$	22.15	-5.37	4.4	0.28	3.6	0.36
6	$f_{ck.cube}^{90}$	30.91	-0.96	-0.22	0.61	-1.53	-0.98
7	ρ^{28}	2.41	-0.026	-0.001	-0.009	0.022	-0.004
8	ρ^{90}	2.392	0.101	-0.032	0.066	0.017	-0.031
9	W/C	0.525	0.025	-0.014	-0.051	0.012	-0.002
10	K_d^{90}	0.697	0.036	0.34	0.19	0.056	0.043

According to the model (1) it can be noted that RH ash at its maximum amount (8%) $x_1 = 1$ reduces the strength to a certain concentration, linear coefficient $b_1 = - 2.04$ and quadratic $b_{11} = 2.21$. On the nomogram where the strength decreases from 18 to 12 MPa at the content of RH ash 6-8 % and the optimal concentration of chemical additive 0.2 ... 0.6 % (Fig.1a).

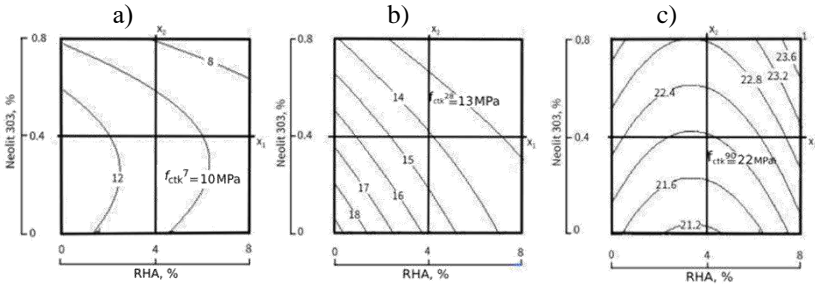


Fig. 1: Nomograms of FGC flexural strength after (a) 7 days f_{ctk}^7 (b) f_{ctk}^{28} and (c) 90 days f_{ctk}^{90}

Analysis of the coefficients of the model f_{ctk}^{28} showed that at the maximum filling of cement with fly ash and the amount of plasticizer to x_1 and $x_2 = +1$, the strength of FGC after 28 days of curing slightly decreases $b_1 = -1.94$ and $b_2 = -1.67$. The nomogram (Fig.1 b) shows that with simultaneous increase in the amount of RH ash and plasticizer, there is a sharp decrease in the strength of f_{ctk}^{28} from 19 to 12 MPa.

Since RH ash as a pozzolanic additive lengthens the setting time of cement, the processes of structure formation on 28 days are not yet completed, it can be seen on the nomogram (Fig.1c) that increasing the plasticizer to 0.8 % and the optimal amount of RH ash 2...6 % provides the maximum strength f_{ctk}^{90} to 23.6 MPa.

From the compressive strength models of FGC (4-6), it can be observed that the maximum cement filling of RHA 8% ($x_1 = 1$) acts negatively. There is a linear effect at $x_1 = 1$ for $f_{ck.cube}^7$ ($b_1 = -1.5$), for $f_{ck.cube}^{28}$ ($b_1 = -5.37$) and for $f_{ck.cube}^{90}$ ($b_1 = -0.96$). The quadratic effects of the models indicate the search for the optimum concentration of RHA in concrete. At factor (x_1), the quadratic coefficient is ($b_{11} = 2.37$) for $f_{ck.cube}^7$, for $f_{ck.cube}^{28}$ ($b_{11} = 4.4$) and for $f_{ck.cube}^{90}$ ($b_{11} = -0.22$).

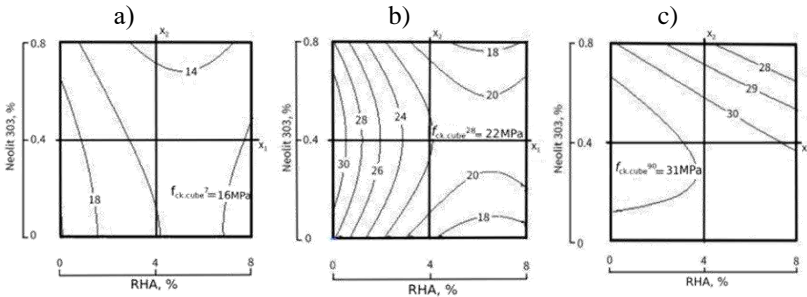


Fig. 2: Nomograms of FGC compressive strength after (a) 7 days $f_{ck.cube}^7$, (b) 28 days $f_{ck.cube}^{28}$ and (c) 90 days $f_{ck.cube}^{90}$

More clearly the change of compressive strength of FGC at different curing times can be seen on nomograms of Fig. 2. In the early terms there is a significant decrease in strength as the cement is filled with RHA the index of $f_{ck.cube}^7$ decreases from 20 to 14 MPa, for $f_{ck.cube}^{28}$ from 30 to 18 MPa. However, 90 days of curing the change in strength is insignificant and depends on the concentration of plasticizer $f_{ck.cube}^{90}$ from 32 to 28 MPa.

The values where the strength $f_{ck.cube}^{28} \geq 30$ MPa are in the region of formulations $x_1 = -1 \dots -0.9$ (RH ash 0...1%) and $x_2 = -0.8 \dots 0.8$ (SP 0.2...0.6). At 90 days of curing, the region where the strength $f_{ck.cube}^{90} \geq 30$ MPa is much wider. Here the amount of RHA in cement increases up to 6 % at an additive concentration of 0.4...0.6 % (Fig. 2c).

Concrete density values can vary depending on various factors. The amount of RHA in cement, its dispersibility, pozzolanic activity. By reducing the number of pores in the concrete structure, it can increase. Due to the lower density of RHA particles compared to cement particles, the density of fresh concrete may decrease. The density of fresh concrete may also decrease at high dosages of RHA. The density of the concrete may increase due to the reduction of the total porosity, due to the active interaction of the RHA with the hydration products. In spite of the density decrease, due to its pozzolanic activity, ash ash promotes the densification of concrete structure and allows to improve its performance characteristics (water resistance and durability). In the model ρ^{28} at x_1 the linear coefficient $b_1 = -0.026$. With increasing the amount of RH ash, the density practically does not decrease from 2.45 to 2.4 kg/m³.

As the curing of concrete with RH ash continues for a long period of time its structure changes due to the formation of additional amount of hydrosilicates. The density model ρ^{90} shows that it depends first of all on the concentration of chemical admixture and then on the filling of cement with fly ash. At the maximum concentration of X_2 - NEOLIT 303 - 0.8 % (Fig. 3b), the density of RHA is $\rho^{90} = 2.425$ kg/m³. The additional introduction of RHA reduces the density to 2.35 kg/m³.

The quality of concrete is also affected by the W/C ratio. The higher the W/C ratio, the greater the number of capillary pores formed in the concrete structure. The effect of the RHA and chemical admixture on the water-cement ratio W/C was evaluated by the model $W/C = f(x_1, x_2)$. The analysis of model (9) showed that RHA (x_1) slightly increases W/C ($b_1 = +0.025$), but up to a certain point ($b_{11} = 0.014$). The positive influence of superplasticizer (x_2) is more significant, here ($b_2 = -0.051$) and ($b_{22} = +0.012$). Thus, at RHA = 4%, W/C decreases as the concentration of superplasticizer increases from 0.58 to 0.48 % (Fig. 4a).

When designing the composition of fine-grained concrete, attention should be paid not only to the quality of raw materials, but also to the

formation of a homogeneous concrete structure. Its homogeneity can be judged by the ratio between the flexural strength and compressive strength, the so-called coefficient of destruction of the structure. And the higher this coefficient $K_d = f_{ctk} / f_{ck.cube}$, the more homogeneous the structure and the higher the ability of the material to resist irregular disturbances and deformations.

At 90 days the processes of structure formation are almost attenuated and according to the coefficient of destruction of concrete it can be noted that the introduction of RH ash, due to its pozzolanic activity improves the microstructure of concrete. At the concentration of chemical admixture 0.4 ... 0.6 % depending on the filling of RHA 0...8 % K_d increases from 0.7 to 0. (Fig.4 b).

Thus, studies have confirmed the possibility of using rice husk ash as an active mineral admixture in cement for the manufacture of fine-grained concrete. Due to high silica content in amorphous form (SiO_2 - 81 %) Rice husk ash exhibits pozzolanic activity. Organo-mineral modification improves the microstructure of cement stone and consequently increases the durability of fine-grained concrete. The strength of concrete at 90-day hardening / $f_{ck.cube}^{90} \geq 30$ MPa is achieved at the content of RHA - 6 - 8 % and concentration of superplasticizer NEOLIT 303 - 0.2...0.8 %. Density ρ^{90} day is in the range of 2.35...2.43 kg/m³. Destruction coefficient K_d increases from 0.7 to 0.9, which indicates the homogeneity and resistance of concrete to various types of loads. The use of RHA will reduce the consumption of cement in the concrete mixture without loss of strength and contribute to more environmentally friendly construction.

1. Zemnukhova, L.A., Fedorishcheva, G.A., Egorov, A.G., Sergienko, V.I. Investigation of conditions for obtaining, composition of impurities and properties of amorphous silicon dioxide from rice wastes // Journal of Applied Chemistry. 2005. T. 78. Vyp. 2. C. 324-328.

2. Mehta, P.K., Malhotra, V.M. Rice husk ash-a unique supplementary cementing material // Advances in Concrete Technology. Canada Centre for Mineral and Energy Technology. Ottawa, 1994. Pp. 419 – 444.

3. Tang, Van Lam, Bulgakov, B., Aleksandrova, O. et al. Effect of rice husk ash and fly ash on the compressive strength of high performance concrete // E3S Web of Conferences 33. 2018. 02030. 10.1051/e3sconf/20183302030.

4. Nguyen, Dinh Chinh, Nguyen, Vinh, Bazhenov, Yu. M. High-strength concrete with complex application of rice husk ash, fly ash and superplasticizers // Vestnik of MSCU. 2012. № 1. C. 77-82.

5. Ngo, Xuan Hung, Tang, Van Lam, Bulgakov, B.I., Aleksandrova, O.V., Larsen, O.A., Ha, Hoa Kee, Melnikova, A.I. Influence of rice husk ash on the properties of hydraulic concrete // Vestnik MGSU. 2018. T. 13. Vyp. 6 (117). C. 768-777.

WAVELET MODELING OF HIGH-FREQUENCY WAVE PROPAGATION IN ANISOTROPIC COMPOSITES

Pysarenko A.N.

(Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

***Abstract.** This paper presents a wavelet model for studying high-frequency wave propagation in thin and moderately thick anisotropic laminated composites. A spectral finite element is developed that can describe the propagation of axial and shear waves.*

***Key words:** composite, wave propagation, wavelet, finite element.*

The need to predict transient responses, characterize mechanical properties, and perform non-destructive evaluation of materials can be effectively addressed by studying wave propagation characteristics of elastic structures [1]. Composite (elastic) structures are increasingly used in many industries due to several advantages, including higher specific strength and modulus, fewer joints, improved fatigue life, and higher corrosion resistance. In particular, Lamb wave-based structural health monitoring, which aims to perform non-destructive assessment, is a very active area of research.

Analytical solutions for wave propagation are not available for most practical structures due to the complex nature of the governing differential equations and boundary/initial conditions. The finite element method is the most popular numerical method for modeling wave propagation phenomena [2]. However, for accurate predictions using the finite element method, typically 20 elements must span a wavelength, which results in a very large system size and huge computational costs for analyzing wave propagation at high frequencies. In addition, the solution of inverse problems is very difficult using the finite element method [3]. The spectral finite element, which follows the procedure of modeling the finite element method in the transformed frequency domain, is very suitable for the analysis of wave propagation. The frequency-domain formulation of the spectral finite element provides a direct connection between the output and the input through the transfer function of the system (frequency response function) [4]. The spectral finite element has very high computational efficiency because the nodal displacements are related to the nodal tractions through a stiffness

matrix dependent on the frequency and number of waves. The mass distribution is accurately fixed, and an accurate elemental dynamic stiffness matrix is derived.

In this paper, a new two-dimensional wavelet based spectral finite element framework for high-frequency analysis with finite dimensions and anisotropic properties of composite materials is presented. The method derives the governing partial differential equations for wave motion and their time approximation using compactly supported high-order Daubechies scaling functions. One of the objectives of the work is to perform eigenvalue analysis to separate the given partial differential equations in spatial dimensions. In the following, the separated partial differential equations are approximated in one spatial dimension using Daubechies low-order scaling functions followed by an eigenvalue analysis similar to the time approximation. The resulting ordinary differential equations are solved exactly in the frequency-wave domain and the solution is used as a shape function for the two-dimensional spectral element.

The working frame in the computational model is a laminated composite plate of thickness h with the global coordinate origin at the mid-plane of the plate and the Z -axis perpendicular to the mid-plane. The results of the spectral finite element Fourier method showed that the governing partial differential equations for wave propagation in laminated composites have five degrees of freedom: u , v , w , φ , and ψ . The terms $u(x, y, t)$ and $v(x, y, t)$ are the mid-plane ($z = 0$) displacements along the X and Y axes; $w(x, y, t)$ is the transverse displacement in the Z direction, and $\varphi(x, y, t)$ and $\psi(x, y, t)$ are the rotational displacements about the X and Y axes, respectively. The quantities N_{xx} , N_{xy} , N_{yy} are in-plane force resultants, M_{xx} , M_{xy} , M_{yy} are moment resultants, and Q_x , Q_y denote the transverse force resultants. Stiffness constants A_{ij} , B_{ij} , D_{ij} are defined as

$$[A_{ij}, B_{ij}, D_{ij}] = \sum_{q=1}^{N_p} \int_{z_q}^{z_{q+1}} Q'_{ij} [1, z, z^2] dz = \int_{-h/2}^{+h/2} \{1, z, z^2\} \rho dz, \quad (1)$$

where Q'_{ij} are the stiffnesses of the q -th lamina in coordinate system, N_p is the total number of plies, ρ is the mass density.

The function $u(x, y, z)$ can be approximated at an arbitrary scale as

$$u(x, y, z) = \sum_k u_k(x, y) \varphi(\tau - k), \quad k \in \mathbf{Z}, \quad (2)$$

where $u_k(x, y)$ are the approximation coefficients at a certain spatial dimension (x and y) and $\varphi(\tau)$ are scaling functions associated with Daubechies wavelets.

The next step after determining the shear coefficients lying outside the local volumes of the laminated composite, through the internal coefficients

taking into account the periodic expansion, can be written in the form of a matrix equation

$$A_{ij} \left(\frac{d^2 u_{ij}}{dx^2} \right) + A_{rp} \Lambda_f \left(\frac{d v_p}{dx} \right) = I_f \gamma_r^2 + I_f \gamma_r, \quad (3)$$

where A_f are the first-order connection coefficient matrix elements obtained after periodic extension; I_f are the inertial coefficients; are the eigenvalues of the shift matrix.

Finally, the transformed nodal forces $\{F^e\}$ and transformed nodal displacements $\{u^e\}$ are related by

$$\{F^e\} = [K^e] \{u^e\}, \quad (4)$$

where $[K^e]$ is the exact elemental dynamic stiffness matrix.

The computational model allowed to obtain dispersion relations for the 8-layer $[0]_8$ laminate. The first antisymmetric mode ($A0$) corresponded to the frequency range below 30 kHz. For high frequencies exceeding 2000 kHz, the phase and group velocities increased according to a polynomial law. In addition, the spectral method of Fourier transforms predicted the appearance of the second antisymmetric mode ($A1$) and the first shear mode ($SH1$) for the same frequency range. Spectral relationships for composite laminates with an asymmetric ply sequence $[0_5/90_5]$ indicate that their wavenumbers have significant real and imaginary parts, implying their non-uniform nature (attenuation during propagation). It was found that fixed boundary reflection from the internal surfaces of the composite sample preserves the shape of the excited wave packet.

The wavenumber values correspond to a sampling time of $\Delta t = 2 \mu s$, which gives a Nyquist frequency of $f_n = 250$ kHz. The wavelet transform method predicts accurate wavenumbers only up to a certain fraction of the Nyquist frequency. This fraction depends only on the order of the Daubechies scaling function used to approximate the original partial differential equations in time.

1. Aggelis D.G. Wave propagation through engineering materials; assessment an monitoring of structures through non-destructive techniques. *Material and Structures*. 2013; 46: 519-532.

2. David Muzel et al. Application of the finite element method in the analysis of composite materials: A review. *Polymers*. 2020; 12(4): 818.

3. Bangerth W. A framework for the adaptive finite element solution of large-scale inverse problems. *SIAM Journal on Scientific Computing*. 2008; 30(6): 2965-2989.

4. Li H. et al. Identification of mechanical parameters of fiber-reinforced composites by frequency response function approximation method. *Science Progress*. 2020; 103(1): 0036850419878033.

Секція 3.
ЕЛЕМЕНТИ КОМП'ЮТЕРНОГО
МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА

VITALY A. VOZNESENSKY, THE CREATOR OF METHODOLOGIES

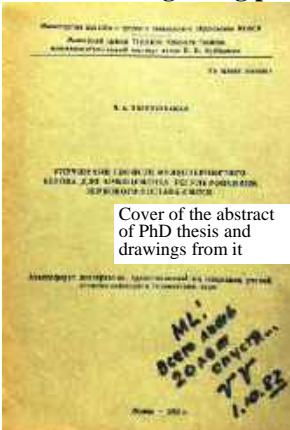
Lyashenko T.V.

(Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture)

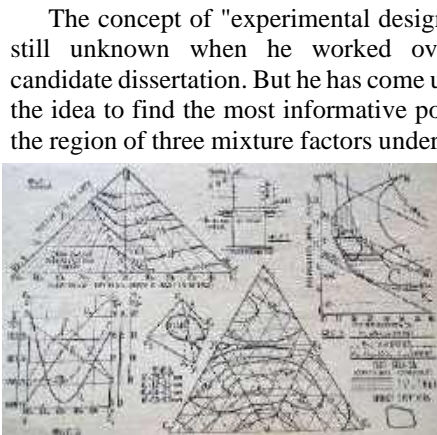
***Abstract.** The purpose of this note is to show the path from the first method of the young researcher to computational materials science, with the methodology of experimental-statistical modelling he created, and to recall the achievements of the outstanding scientist.*

***Keywords:** design of experiment, system approach, experimental-statistical model, education, research.*

It is practically impossible to fully present a prominent multiface personality. This note is about possibly the most important, the essential side of Prof. V.A. Voznesensky activity (VAV, 1934-2012). His first publications (by student, and by young researcher) and his first author's certificate¹ can be taken as **the beginning point** at his road of methods.



Cover of the abstract of PhD thesis and drawings from it



The concept of "experimental design" was still unknown when he worked over his candidate dissertation. But he has come up with the idea to find the most informative points in the region of three mixture factors under study.

¹ Лисенко Е.И., Вознесенский В.А. Механическое изготовление встречных сопряжений в деревянных деталях. Строит. мат-лы и изделия: Тр. Ростов. ИСИ, 1957, Вып. 8, С. 178-188.

Родов Г.С., Вознесенский В.А. Методика определения прочностных и деформативных свойств армоцемента. Новосибирск: Зап.-Сиб. филиал Академии стр-ва и архит-ры СССР, 1958, 24 с.

Вознесенский В.А. А.С.120017 СССР, кл. 42е, 14. Способ определения удобоукладываемости растворной смеси для изготовления армоцементных изделий и прибор для осуществления этого способа. Заявл. 15.08.58. Зарегистр. 12.03.59.

His scientific supervisor Prof. N.A. Popov advised him to take up mathematical research methods. And that's what happened. Soon the first paper on design of experiment (DoE) in building materials technology has appeared, written by VAV [1].

And more than that has happened. The system approach and probabilistic-statistical thinking have become the integral attributes of his work. The first chapter of his first book [2] is "Technology as Stochastic System and Methods of Its Studying". This wonderful, deep, and wise book by the young researcher is filled with new methodological approaches and criteria, useful schemes for research and tools useful for solving practical problems. It has been the book ahead of time.

It was preceded by dozens of publications on construction technology, on other areas of knowledge, on solved problems [3]. The quality and quantity of his works from the Chisinau period (without computers!) and their titles are impressive – as if it were now, but about 60-50 years ago [3, 4].

Here are some: The Possibilities of Creating a Recipe Memory for Concrete Technology (1966), Homogeneity as a criterion of concrete quality (1967), Possibilities of application of game theory in problems related to



durability of materials (1970) , On the issue of qualimetry of materials (1970), Mathematical methods in improving concrete technology (1970), Classification and analysis of sources of technological information in solving problems of analysis and optimization of the quality of building materials (1970), Modern research methods (1971). Structural-substantial models as an object of functional statistical modeling in building materials technology (1971), Algorithm for selecting additives-regulators of the quality of hydraulic concrete (1971), Ways to improve standards for building materials (1971), Statistical search for optimal chemical additives (International Congress on Cement Chemistry, 1974), etc.

So the theme of his DSc thesis « Statistical solutions in problems of analysis and optimisation of the quality of building materials (methodology and application experience)», presented in 1970 (by 36 year old researcher) couldn't be surprising.

The legendary conferences in Moldova organized by VAV were also impressive. He continued to preach the effective research methods based on

fundamental knowledge while working at the Odessa Civil Engineering Institute (since 1975). Here he created the department of "Processes and

Apparatus in Construction Materials Technology", the first one in the USSR. The title and content of the department already included the "METHOD" in a broad sense and a wide range of science-intensive disciplines. That is why the department continues to develop despite difficult circumstances.



Consulting

Vitaly Anatolyevich has been the preacher of fundamental sciences. They became the slogan of the 47 seminars he held in the Odessa House of Scientists and in Kyiv² (including 13 MOCs, international seminars on modelling and optimisation of composites).



Thinking

He managed to develop and implement throughout the Soviet Union the educational program "Numerical Methods for Solving Technological Problems on Computers". And the still useful and cited textbook has been written [5].

A significant part of the textbook is related to the methodology of Experimental-Statistical modeling (ESM) V.A. Voznesensky has created. The term firstly appeared in the book [6]. Much earlier, ES-models were already repeatedly used by him in various studies of materials and other objects. And later

VAV himself or with co-authors published a lot of books conference papers, chapters, brochures and manuals.

Professor Vitaly Voznesensky created the methodology aimed at extracting from the experiment as much as possible information about the system under study.

² Список семинаров МОК и материалов к семинарам

https://drive.google.com/file/d/1ECLBh4O_4YS8NBJNHx_WLFxMihx8FW6Z/view

It could be profitable (and it has been) to use ES-models to research (at nano-, micro-, mezzo-, macro level) and to design:

- multi-component binder systems with additions of slag, fly ash, other mineral additives, alkali ingredients, and polymer admixtures,
- specially purposed repair, protective and furnishing compositions resistant to heat, frost, dynamic load, various media,
- polymer-cement dry mixes of various purpose,
- polymer mortars,
- fiber reinforced composites,
- light weight aggregate, cellular, and foam concretes,
- ready-mix concrete,
- any high performance material.

Moreover, ES-models describing the fields of system properties in coordinates of the factors defining them have become the irreplaceable constituent of the Composition-Processes Fields Methodology (CPFM) in computational materials Science [7]. And moreover, both of these methodologies (ESM and CPFM) are interdisciplinary.

Vitaly Anatolyevich Voznesensky has brought the design of experiment, the system approach, and probabilistic-statistical thinking into building materials science. This was achieved thanks to his books, brilliant lectures for students and professionals, manuals, numerous papers, methodical recommendations and guidelines, his invaluable consultations, the seminars and conferences he had organized, his sparkling performances.

Voznesensky's books and textbooks have been published in a print run of more than 54,000 copies (not counting numerous brochures). A number of significant publications not mentioned above are given [8-16] in the bibliography. The ideas and methods of VAV have been tested in PhD and DSc dissertations completed under his supervision (there have been about 50 of them).



This is where the term “Experimental-statistical modelling” was born



One can find more about Vitaly Voznesensky and electronic versions of many of his works at <https://frabul16.wixsite.com/dvoe>.

1. Вознесенский В.А. Планирование эксперимента по технологии мелкозернистого бетона. Заводская лаборатория, 30 (3), 1964. С. 337-339.
2. Вознесенский В.А. Статистические решения в технологических задачах. Кишинев: Картя молдовеняскэ, 1969. 232 с.
3. Виталий Анатольевич Вознесенский / Сост. Т.В. Ляшенко. Одесса: Астропринт, 2003. 92 с. (Сер.: Библиография ученых / МИА).
4. Ляшенко Т.В. Несколько меток в биографии В.А. Вознесенского (ВAB, VAV) // Моделирование и оптимизация композитов, Одесса, Астропринт, 2014. С. 6-11. https://drive.google.com/file/d/1UpwCZ5F2RDQdBAoquLDM7_vBhiDKUljY/view
5. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Численные методы решения строительно-технологических задач на ЭВМ. – К.: Вища школа, 1989. 328 с.
6. Современные методы оптимизации композиционных материалов / Под ред. В.А. Вознесенского. К.: Будівельник, 1983. 144 с.
7. Ляшенко Т.В., Вознесенский В.А. Методология рецептурно-технологических полей в компьютерном строителном материаловедении. Одесса: Астропринт, 2017. 168 с.
8. Баженов Ю.М., Вознесенский В.А. Перспективы применения математических методов в технологии сборного железобетона. М.: Стройиздат, 1974. 192 с.
9. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. М.: Статистика, 1974. 192 с.
10. 2-ое изд., перераб. и доп. М.: Финансы и статистика, 1981. 263 с.
11. Вознесенский В.А., Ковальчук А.Ф. Принятие решений по статистическим моделям. М.: Статистика, 1978. 192 с.
12. Борщ И.М., Вознесенский В.А., Мухин В.З. Процессы и аппараты в технологии строителных материалов: Учебник для вузов. – К.: Вища школа, 1981. 296 с.
13. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. – К.: Будивельник, 1989. 240 с.
14. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A. Experimental-statistical modeling in computational materials science, 3rd Int. Applied Statistics in Industry Conf., Dallas, ACG Press.(Wichita), 287-298, 1995.
15. Методические рекомендации по применению экспериментально-статистических моделей для анализа и оптимизации состава, технологии и свойств композиционных материалов на основе щелочных вяжущих систем / Науч. ред. В.А. Вознесенский, П.В. Кривенко. ОГАСА, НИИВМ им. В.Д. Глуховского. К., 1996. 105 с.
16. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Gavriliuk V.P. Multicriterion optimisation of autoclaved aerated concrete properties and expenditure of energy resources // Brittle Matrix Composites 9: Proc. 9th Int. Symp. BMC9. Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., 2009. P. 219-226.

ABOUT COMPUTATIONAL EXPERIMENTS TO ANALYSE THE CORRELATION OF BUILDING COMPOSITES PROPERTIES

¹Lyashenko T.V., ²Moskalova K.M., ¹Antoniuk N.R.

(¹Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa,

²Development and Training Centre for the Metal Industry – Metal Center
Čakovec, Croatia)

Abstract. Computational experiment to analyse material properties correlations, using random scanning of properties fields in composition coordinates, is briefly described. The results of its applications in studies of plaster mortars and lime suspensions with cellulose fibers are shown.

Keywords: experimental-statistical model, random scanning of property field, rheological characteristic, plaster mortar, lime suspension, fibre.

Why should correlation be analysed? Why is this important?

There exist at least three situations when we need quantitative expression of the relation between material properties (Y), the "measuring" and analysis of their correlation.

Firstly, it could allow to arrange express-control of the properties, specifically, based on non-destructive tests, with the help of sufficiently accurate and reliable prediction equations (calibration curves).

Secondly, it could make possible to reduce a number of criteria by which material should be designed and optimized.

Thirdly, the difference in correlation measure at different zones of the region of composition and process parameters (CP-factors) could reveal the conditions, under which the mechanisms of structure formation and of destruction change, thus possibly leading to formulating some hypotheses for materials science.

If it is commonly supposed that some two properties do not relate to each other (with scatter diagrams illustrating the fact), do not be sure they really don't.

When designing a natural experiment, the primary source of factual data on the material being studied, we try to save time-consuming natural tests. Being so, in certain zones of the region of CP-factors, which can lead to different material structures, there is insufficient data (1-3 trials) to assess the correlation of properties in these zones.

It is possible to get on the necessary missing data, to enrich the results obtained in natural (primary) experiment with the data mined in computational (secondary) experiment. The paired samples of any size (n) necessary for the analysis and for building possible prediction equations can be simulated with the help of experimental-statistical (ES) models obtained on the results of designed primary natural experiment.

Let the pair relation of these or that two properties of building material (random variables Y_1 and Y_2) is considered. They take values in a region of the CP-factors $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_k)$.

To reveal the existence of correlation and distinctions in relation between Y_1 and Y_2 in various zones of factor domain and to characterize these relations the random scanning of the fields $Y_1(\mathbf{x})$ and $Y_2(\mathbf{x})$ is carried out [1]. Statistical trials are being implemented, with Monte Carlo method applying twice.

In each realization of the trials the sufficiently great number of (\mathbf{x}) uniformly distributed in the whole factor region under study or in its subregion is generated. For each \mathbf{x} to the level of the property (Y) calculated by corresponding ES-model the generated normally distributed experimental error is added. By n pairs of these values the point estimate of correlation coefficient r (or other correlation measure) is obtained. Multiple realization of such trials makes it possible to get the distribution of r .

The method briefly described above has already been used many times in studies of various building composites [1-3]. Some recent results of its applications in two studies [4, 5] are shown below.

When developing lightened plaster mortars [4] the quantities of 4 components were varied in the experiment: ground limestone (x_1), perlite sand (x_2), cellulose methyl ether (x_3), and dispersible polymer powder (x_4). The contents of other components remained constant. The viscosity curves and the values of rheological characteristics (Y) were determined for 18 compositions, according to 18-points of 4-factor design of experiment. On these data ES-models were built, in particular, for effective viscosity at shear rate equal unity (η_1) and destruction rate ($|m|$), the parameters of Ostwald-de Waele model [6], and for thixotropy characteristic (A_{th}).

The models allowed the computational experiments for analysis of correlation to be carried out. Some of the results, in compare with results of natural experiments are shown in Figures 1-3 (from [4]).

Viscosity curves and Ostwald-de-Waele rheological equations (adequate with error not more than 5% in the range of shear rate between 0.066 and 8.41 c^{-1}) were obtained **when studying lime suspensions** filled with Technocel® cellulose fibers of three lengths [7].

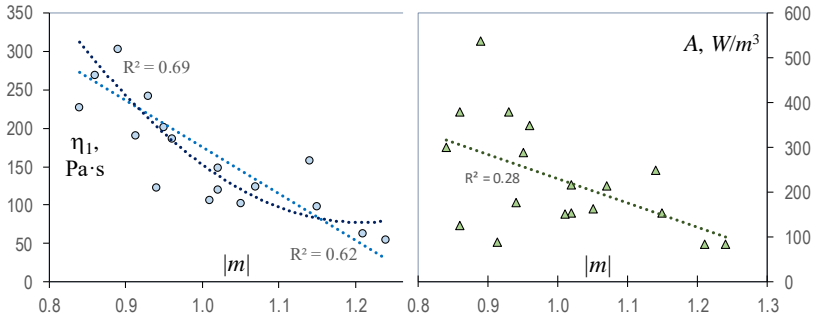


Fig. 1. Scatter diagrams of viscosity at shear rate equal to 1 s^{-1} , of destruction rate, and thixotropy of 18 compositions (results of natural experiment)

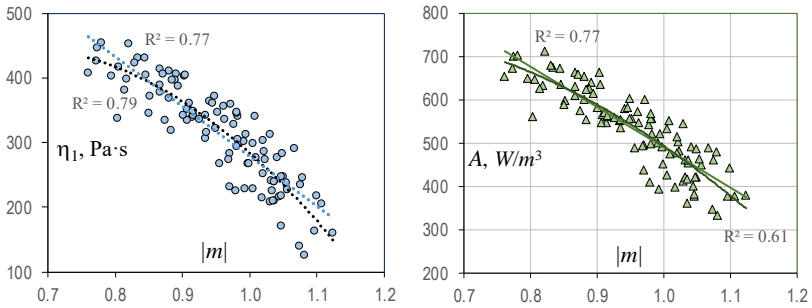


Fig. 2. Scatter diagrams of the estimates of rheological characteristics at upper content of perlite and methylcellulose obtained in computational experiment (results of one trial)

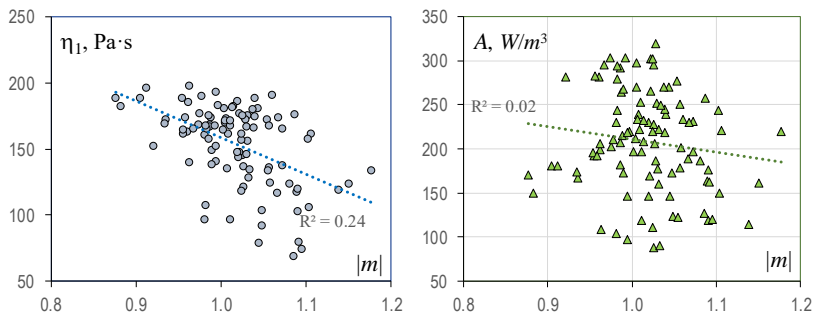


Fig. 3. Scatter diagrams obtained in computational experiment at the lowest content of perlite and methylcellulose

Three factors were varied in the experiment: mass fraction of "short" fibers, with nominal length of $200\ \mu\text{m}$ – v_1 ; fraction of "medium" length fibers, $1000\ \mu\text{m}$ – v_2 ; fraction of "long" fibers, $2500\ \mu\text{m}$ – v_3 .

They present the "mixture" (1).

$$0 \leq v_i \leq 1, \sum v_i = 1, \mathbf{v} = (v_1, v_2, v_3) \quad (1)$$

These factors region is 3-component simplex (triangle).

The values of η_1 and $|m|$ determined for compositions corresponding to design of experiment (simplex-lattice design of incomplete 3rd degree) did not show any correlation.

But this may not be the case in some subregions of the whole triangular region. In some zones of compositions within the simplex, the structures of moving suspensions may show an inherent correlation of viscosity with the rate of destruction.

It would be reasonable to assume a significant difference in the structures of suspensions with fibers of different lengths and with their mixtures, and, consequently, a different relationship between η_1 and $|m|$.

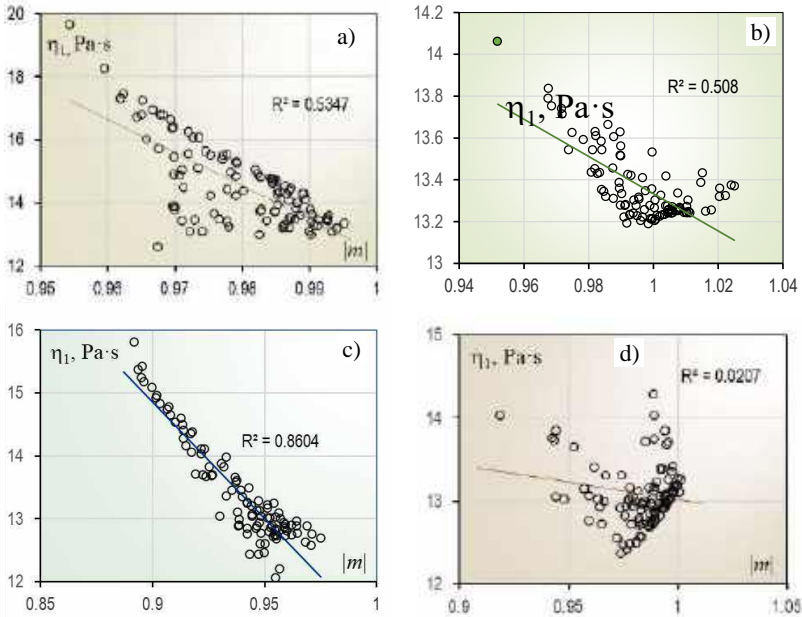


Fig. 4. Scatter diagrams obtained in computational experiments:
a) in zone of mostly "short" fibre, b) in zone of mostly "medium" fibre,
c) in zone close to vertex v_3 (of "long" fibre), d) inside the triangle

Therefore, the computational experiments have been carried out for several areas of the triangle. ES-models describing the fields $\eta_1(\mathbf{v})$ and $|m|(\mathbf{v})$, built on results of natural experiment, have been used. Some of the results are shown in Fig. 4 (from [5]).

It can be stated in the **conclusion**, that the means of computational materials science, in particular, the approach of random screening the composition-process fields of material properties, described by experimental-statistical models, can help in solving the variety of material science problems. Exploring the relations between material properties is among them. Computational experiments allow the knowledge to be obtained that is not directly available in the physical experiments.

1. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A. [Composition-process fields methodology](#) in computational building materials science (in Russian). – Odessa: Astroprint, 2017. 168 p.

2. Lyashenko T., Kryukovskaya S. Modelling the influence of composition on rheological parameters and mechanical properties of fibre reinforced polymer-cement mortars // *Brittle Matrix Composites 10*. – Warsaw: Woodhead Publ. Ltd., 2012. P. 169-178.

3. Lyashenko T., Kersh V., Kolesnikov A. Heat-insulating gypsum composite: modelling the influence of composition on pore structure // *Proc. 20. Internationale Baustofftagung, Weimar, 2018, V. 2. P. 2.577-2.584*.

4. Moskalova K., Lyashenko T., Aniskin A. Modelling the Relations of Rheological Characteristics with Composition of Plaster Mortar. *Materials*, 15(1):371, 2022.

5. Lyashenko T.V., Antoniuk N.R., Khlytsov N.V., Bichev I. Computational experiments when studying materials properties influenced by "mixture" factors // *Сучасне будівництво та архітектура*, 9, 2024. P. 62-70.

6. Schramm, G. *A Practical Approach to Rheology and Rheometry*, 2nd ed., Gebroeder Haake, Germany, 1994. 290 p.

7. Lyashenko T.V., Voznesensky V.A., Antoniuk N.R., Karapuzov E.K. Modelirovanie i analiz reologicheskikh pokazatelej sistemy` «izvest` – voda – czellyulozny` e volokna»" // *Vi`snik Donbas*, vol. 2002-1(32), 2002. P. 93-98.

Секція 4.

**АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО:
ТЕХНОЛОГІЯ ТА МАТЕРІАЛИ**

МЕТОДИКА ПІДБОРУ ФІЛАМЕНТА ДЛЯ 3Д ДРУКУ ВИРОБІВ, ЯКІ ЕКСПЛУАТУЄТЬСЯ У СКЛАДНИХ УМОВАХ

¹Бачинський В.В., ²Шкурпіт О.М.

(¹Одеська державна академія будівництва та архітектури,

²Військова академія, м. Одеса)

Abstract. *A study of the properties of various polymers used in additive manufacturing was carried out, their influence on the quality of product elements was determined, and a methodology for selecting materials for its high-quality printing was developed.*

Keywords: *filament, additive technologies, 3D printing*

Вагомим фактором, який найбільше впливає на властивості надрукованого виробу, звичайно ж, є марка і якість філаменту, особливо властивостей матеріалу в складних умовах експлуатації. Тому можна стверджувати, що важливим завданням є вивчення алгоритму підбору матеріалу для виготовлення елементів виробу за адитивними технологіями.

Аналіз отриманих результатів показує, що абсолютно ідеального матеріалу для друку немає. Вибір матеріалу для друку виробу залежить від задач виробу та умов його експлуатації.

У технічних паспортах різних 3D-принтерів прийнято описувати обмежений перелік їх характеристик, які можна порівнювати, але вони повною мірою не можуть описати якість виробів на виході.

Розробка порядку підбору композиційного матеріалу дозволяє вирішити суперечність визначення того матеріалу, який застосовують в адитивному виробництві, оскільки вибір філаменту обмежується технічними характеристиками, зазначеними в паспортах пристроїв, вимогами до виробу та необхідною якістю отриманого елемента виробу.

Основні вимоги до вибору філаменту для друку повинні суворо дотримуватися. Міцність на вигин, міцність на розтягування, твердість полімерного матеріалу мають перевищувати або відповідати числу, вказаному в технічному завданні. Щільність, усадка, водопоглинання

полімерного матеріалу не повинні перевищувати (або дорівнювати) відповідному показнику, зазначеному також у технічному завданні.

Нами було визначено шість груп якісних характеристик отриманого елемента для пошуку наближеного за сукупністю властивостей філамента відповідно до вимог технічного завдання (табл. 1, у якій V_v – це вимоги до виробу).

Таблиця 1 – Фізико-механічні показники для вибору філамента

№	Показник	Розмірність	Виконання умови
1	Міцність на вигин (V_1)	МПа	$V_1 \geq V_v$
2	Міцність на розтягування (V_2)	МПа	$V_2 \geq V_v$
3	Щільність (V_3)	г/см ³	$V_3 \leq V_v$
4	Твердість за Роквелом (V_4)	R-шкала	$V_4 \geq V_v$
5	Усадка (V_5)	%	$V_5 \leq V_v$
6	Вологопоглинання (V_6)	%	$V_6 \leq V_v$

Під час вибору філамента можливі два варіанти, розглянемо їх.

1. Один або кілька відповідних полімерів. Вибираємо кращий за сукупністю властивостей, виходячи із вимог до виробу.

2. Немає відповідного полімеру. Якщо не дотримуються умови технічного завдання щодо виконання всіх шести вимог, то друк виробу не можливий. У разі виконання хоча б трьох вимог допускається використання полімерного матеріалу для друку виробу, але за дотримання таких обов'язкових двох умов: $V_3 \leq V_v$, $V_4 \geq V_v$.

Для виявлення найбільш важливих показників якості елементів виробу, розроблено процедуру структурування функцій якості. З метою її реалізації виявлено вимоги та якісні характеристики, які в подальшому зіставлені для знаходження зв'язку між ними у матриці сумісності вимог (табл. 2).

Таблиця 2 – Матриця сумісності «вимоги – якісні характеристики»

Вимоги	Якісні характеристики					
	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6
Удароміцність	++	++	+	+++	-	-
Складність деталі	-	-	-	-	++	-
Герметичність	-	-	+	-	-	+
Маса деталі	-	-	+++		+	+
Гладкість поверхні	-	-	-	-	++	-
УФ захист	-	-	-	+	-	-
Швидкість друку	-	-	+	-	+	-

На рис. 1 наведено технологічну схему вибору філаменту для виробу, який експлуатується у складних умовах.

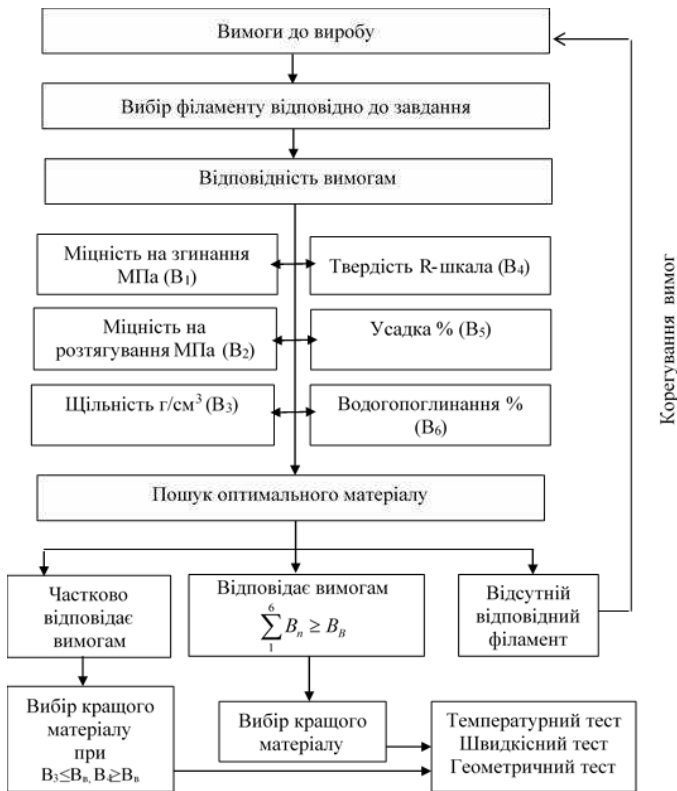


Рис. 1. Технологічна схема вибору матеріалу для виробу, який експлуатується у складних умовах

Для вибору пластику (філаменту), що найбільш повно задовольняє вимоги до виробу, який експлуатується у складних умовах, нами було проаналізовано найпоширеніші на території України його види, які мають різні фізико-механічні характеристики. Кожен із досліджених матеріалів має низку переваг та недоліків. Для найбільш доцільного вибору філаменту, що відповідає певним технологічним характеристикам, було розроблено спеціальну порівняльну таблицю (табл. 3).

Таблиця 3 – Порівняльна таблиця технічних характеристик пластику за вимогами до виробу

Тип пластику	ABS	PLA	PETG	Nylon	HIPS
Межа міцності та вигин, МПа	41	55,3	76,1	70	37,6
Межа міцності на розрив, МПа	22	57,8	36,5	66-83	16,4
Усадка, %	0,8	0	0	1,2	0,4
Щільність, г/см ³	1,1	1,25	1,3	1,13	1,05
Твердість за Роквелом	105-110	70-90	106	-	79
Вологопоглинання, %	0,2-0,45	0,2-0,4	0,12	3,1	1

Аналіз отриманих результатів показує, що абсолютно ідеального матеріалу для 3D-друку немає, оскільки кожен має як негативні, так і позитивні характеристики, тому вибір залежатиме від призначення виробу та умов його експлуатації.

Проаналізувавши дані зведеної таблиці технічних характеристик пластику, можна зробити висновок, що найбільш придатними і технологічно вигідними матеріалами, наприклад для елементів виробу, який експлуатується у складних умовах, є HIPS, ABS і PETG. Основними характеристиками, які зумовлюють вибір, є: щільність, твердість і вологопоглинання. Вони впливають на такі найважливіші параметри, як: маса апарата, герметичність і вологостійкість його корпусу.

Також визначено, що для виготовлення основних елементів виробу, який експлуатується у складних умовах, можна застосовувати HIPS-пластик, оскільки за своїми характеристиками він має найменшу щільність (1,05) за нульового відсотка вологопоглинання. Застосовуючи цей філамент, можна досягти найвигідніших показників маси апарата, а також вологопоглинання. У той же час пластик ABS надасть максимальної твердості виробу.

Матеріал PETG також має майже нульовий відсоток вологопоглинання, але для нього характерна найбільша щільність, що може призвести до небажаного обтяження апарата, незважаючи на це, даний вид філаменту відмінно підходить для виготовлення гнучких, сполучних механізмів виробу.

Таким чином аналіз механізмів управління якістю розробки елементів виробу, який експлуатується у складних умовах свідчить, що технологічна схема підбору композиційного матеріалу є важливим елементом для 3D-друку сучасних виробів та їх комплектуючих.

ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ ПАНЕЛЬНОГО БУДІВНИЦТВА

Чучмай С.М.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The article examines the advantages and disadvantages of panel construction. Some ways to overcome the shortcomings are considered.*

***Keywords:** joints, panel construction, precast concrete.*

В зв'язку з потребою швидкого будівництва житла в Україні особливе значення набуває панельне будівництво.

Відношення до панельного будівництва не однозначне, так як масова забудова 70 - 80-х років минулого сторіччя була представлена малогабаритними і незручними квартирами. Основними недоліками і незручностями панелей були низька шумоізоляція, висока теплопровідність, мала кількість планувальних рішень та одноманітних фасадів.

На сьогодні панельні технології по своїм якостям зробили значний крок вперед. Сучасні залізобетонні панелі дозволяють зробити проект будь-якої складності.

Основною перевагою збірного залізобетону являється висока якість виробів, яку гарантує завод-виробник. В даний час для більшої уніфікації виробів та якісної прокладки інженерних комунікаційних мереж в панелях широко використовується 3D проектування. Висока готовність виробів під подальше оздоблення також скорочує витрати та строки виконання робіт.

Однією з переваг збірного залізобетону являється точний розрахунок строків будівництва. Така можливість виникає тому, що завод-виробник може випускати продукцію то технології «точно в строк» та по мірі виконання монтажу доставляти її на будівельний майданчик. Що дозволяє вести процес безперервно, тому швидкість будівництва з готового збірного залізобетонна майже в два рази вища ніж у монолітного залізобетону.

Ще однією з якісних рис залізобетонних конструкцій являється можливість вести будівництво в будь-яку пору року, при будь-якій погоді. Це виступає важливим фактором.

Проте самою головною задачею панельного будівництва являється розробка стиків, з якими панельні будинки не будуть поступатись по довговічності монолітним.

Експлуатаційні якості стиків сполучення зовнішніх великорозмірних стін будівель залежать принаймні від трьох факторів:

- а) конструктивного вирішення стику;
- б) призначення матеріалу заповнювача та його складу;
- в) способу та умов здійснення стиків на монтажі.

Самонесучі або навісні стіни великопанельних будинків мають, як правило, з'єднання в стик рівними площинами. При цьому як прокладка в стиках використовуються розчини. Іноді укладають джгут або канати з наступним закладенням швів зовні цементними розчинами.

Однак така конструкція стику потребує якісного та ретельного виконання його при монтажі. Недотримання вертикальності панелей при їх установці і недостатня щільність укладання розчину, що підстилає, створюють в горизонтальному стіку умови, сприятливі для попадання води в товщу панелі.

Тому найкращим конструктивним рішенням горизонтального стику буде пристрій стику в чверть з прокладкою по полиці джгута або просмоленого каната з подальшим закладенням шва в підрізування цементним розчином. Склади таких розчинів для різних умов виконання робіт будуть, звичайно, різні. Вони повинні бути розроблені та передані для практичного застосування у будівництві спеціальним технічним документом.

Якщо для горизонтальних стиків конструктивне рішення в чверть при деякому ускладненні форм є хорошим рішенням стику, то для сполучень панелей по вертикалі уступи або чверті в товщі панелі не вирішують завдання, і найголовнішою умовою гарантії від протікання є якість самого заповнювача стику та його виконання на монтажі.

Закладення вертикальних швів (нагнітання розчину, забивання або зачеканка джгутів та ін.) повинно ретельно виконуватися, бо незаповнений шов зводить нанівець переваги найкращої конструкції.

У ряді випадків спостерігається промерзання окремих ділянок зовнішньої стіни через наявність теплопровідних містків. Найчастіше такі містки виникають у кутах приміщення, де зосереджуються вісім залізобетонних елементів (чотири зовнішні панелі, дві панелі перекриття та дві панелі перегородок). Застосування утеплювача, що не

має строго фіксованих розмірів, призводить до небезпечного потовщення залізобетонних ребер зовнішніх панелей.

Для запобігання можливості розширення в процесі виробництва оздоблювальних ребер необхідно застосовувати спеціальні фіксатори з точними розмірами.

Виникають також питання щодо збільшення вогнестійкості панелей перекриттів у зв'язку з їхньою тонкостінністю, а також необхідністю поліпшення конструкцій акустичної стелі у зв'язку з її невисоким ступенем закінченості для монтажу та підвищеним згоранням.

Стики – основна проблема крупнопанельного будівництва, але шляхи її вирішення шукаються і в зв'язку з швидким розвитком будівельних матеріалів будуть знайдені.

1. Leupen B., Mooij H. Housing Design. A Manual. Nai Publishers. Rotterdam, 2011. 448 p.

2. Pfeifer G., Brauneck P. Town Houses. A Housing Typology. Birkhauser Verlag AG. Базель; Бостон; Берлін, 2009. 128 с.

3. Васильев Н. Ю. Эволюция типологии массового жилища в советской архитектуре межвоенного периода / Отв. ред. Т. Г. Малинина // Массовое жилище как объект творчества. Роль социальной инженерии и художественных идей в проектировании жилой среды. Опыт XX и проблемы XXI века. М.: БуксМАрт, 2015. С. 110-121.

4. Бронуицкая А. Ю. Основные тенденции в экспериментальном проектировании жилых домов и комплексов в 1960–1970-х годах. Работы московских проектных институтов // Массовое жилище как объект творчества. Роль социальной инженерии и художественных идей в проектировании жилой среды. Опыт XX и проблемы XXI века.

5. Гнедовская Т. Ю. Реформа жилища в Веймарской республике. «Война крыш» / Отв. ред. Т. Г. Малинина // Массовое жилище как объект творчества. Роль социальной инженерии и художественных идей в проектировании жилой среды. Опыт XX и проблемы XXI века. М.: БуксМАрт, 2015. С. 58-73.

**EARTH-BASED MATERIALS FOR ADDITIVE MANUFACTURING
IN CONSTRUCTION: A SELECTIVE REVIEW OF MIX DESIGN**

Maslyanenko Y.V.

(Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

***Abstract.** A state-of-the-art report on the up-to-date research on the additive manufacturing (AM) in construction - 3D printing technology from the earth-based materials perspective. Ways of tailoring effective mix design for the in-situ printing process using local materials.*

***Keywords:** 3D printing; extrusion; mix design; printable earth-based structures.*

Additive manufacturing (AM) of frame elements and buildings and structures in general has proven that it has the potential to become one of the most promising areas of development of the construction industry. AM offers a high level of process automation, higher quality of the final product due to the reduction of the impact of the human factor (mistakes) and a lower level of occupational hazard at the construction site compared to conventional construction process. At the same time, additive manufacturing is more adapted to modern design methods, such as front-load design with the great options of mass-customization.

Originated from the traditional materials manufacturing and building techniques for the construction industry, the use of concrete with various types of binders and variety of aggregates and additives as a material for 3D printing has received wide attention and increased interest from researchers. An illustration of this interest can be the fact that over the decade the number of printed articles in SCOPUS related to research on improving the technology and formulation of C3DP formulations has increased almost 400 times [1].

Despite some success, concrete as a material for 3D printing have drawbacks that may affect it usage in the long run. First, it is a "carbon footprint" associated with both the energy-consuming production process and transportation costs – in many regions, cement or raw materials for cement clinker are imported materials. Cement-based building materials are quite difficult to recycle, and they have a very few options for reuse. Another factor

that affects the widespread adoption of this technology is relatively high direct costs, both in terms of the cost of materials and equipment.

To reduce the negative impact on the environment and increase economic efficiency, the scientific approach is widely used. Scientists and researchers develop effective building mixtures using environmentally friendly materials [2], renewable biopolymers, by-products and industrial wastes, and processed products. Particular attention is paid to fillers – fibers of various origins and nano-materials that have a positive effect on rheological and mechanical properties [3, 4].

Unlike cement-based materials, soil mixtures are more compatible with modern environmental standards in terms of CO₂ emissions. Most local soil materials are suitable for the manufacture of mixtures for 3D printing with minimal processing (sieving). In addition, houses made of soil materials considered more effective for controlling temperature and humidity conditions inside the premises.

The biggest disadvantages of soil mixtures for 3D printing is relatively high water content in the mixture and, accordingly, a longer drying time and gaining initial strength (green strength), a tendency to uneven deformations when drying and, as a result, the appearance of cracks. Soil mixtures have much lower strength characteristics compared to cement-based mixtures, as well as low resistance to moisture on finished structures. These shortcomings make it mandatory to use additives to improve the properties of the soil mixture.

The available reviews showed that use cements as additives decreases advantages of earth-based mixtures, although it allows increasing buildability (with the addition of ~15% of cement binder and, accordingly, reducing the amount of water to 22-28% of the mass of dry components of the mixture) [5]. Therefore, the researchers' attention focused on the use of biodegradable and recycled polymeric and mineral materials as additives.

An interesting illustration to the problem is the geographical distribution of studies of mixtures based on cement and soil materials (Fig. 1). Fast industrial development in China, India and Middle East leads to use of concrete mixes as a preferable material for 3D printing. “Old’ world economics consider sustainability as a more suitable way of development and therefore, inclined towards soil-based matrices for additive manufacturing in construction.

Majority of researches of cement-based mixes concentrated on the study on the mixes’ technological properties by addition of various types of fibers (steel, polymer, etc.). The studies of soil mix designs examine the possibility of improving the characteristics of the mixture by adding organic by-products and industrial wastes.

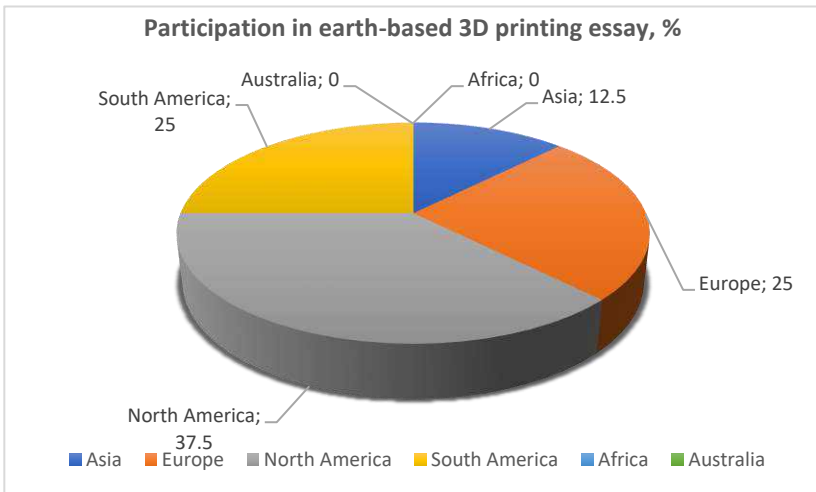
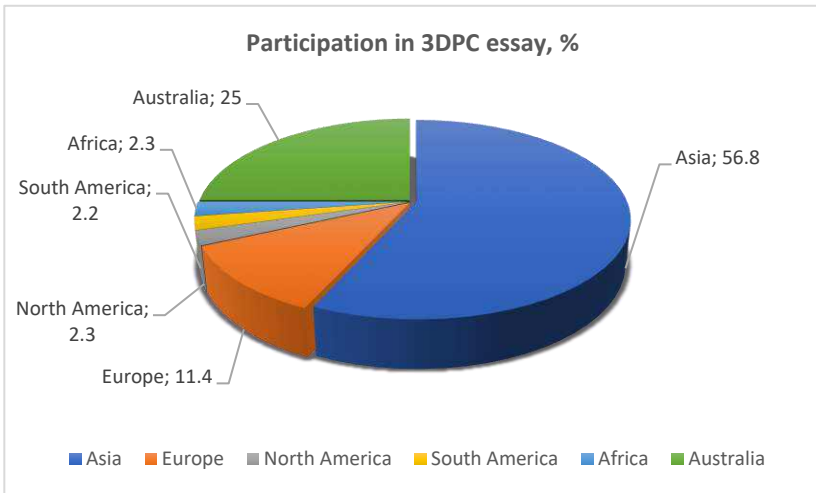


Fig. 1

- a. Participation of countries in 3DPC essay
- b. Participation of countries in earth-based 3D printing essay

To start with, it is necessary to mention pioneering study of the A. Perrot et al. Using of biopolymer – alginate (alginic salt Cimalgin HS3®) proved that it can considerably improve the time required to develop sufficient green strength of 3D printed earth wall, with final strength compatible to the rammed earth wall, but with no requirements for formwork [6].

The potential of use of local earthen materials in New Mexico, USA, were studied by the Department of Civil, Construction and Environmental Engineering University of New Mexico, Albuquerque, NM, USA [7]. The collected soil was classified according to the ASTM D2487 - Unified soil classification system (USCS). The best result was demonstrated by the mix design with addition of hydraulic lime (4% of dry mass of the mixture) and wheat straw fiber (1/5%) cut to the length not more than 15 mm. Need to mention, that selected soils from various locations near Albuquerque were sandy types with low content of the clay which barely meet minimal requirements of plasticity, suitable for extrusion process.

Another study of multinational team evaluated applicability of chitosan and potato starch as stabilizers for mechanical and water durability properties improvement of earth-based matrices reinforced with sisal (agave) fibers. Research showed that earth mix with natural fiber stabilized with chitosan (3%) showed better wettability resistance and water impermeability than those stabilized with potato starch (5%) [8]. No researches of long-term effects of chitosan to mechanical properties and wettability resistance were conducted.

The problem of the shrinkage/cracking were addressed with proposed solution of the quality of earth-printed structures improvement by using of sodium hexametaphosphate (SHMP). Adding SHMP (from 0.55 to 2.2%) showed remarkable results in reducing number of cracks of samples to 0, with replacement 50% of wt. of local soil contend with fine sand [9]. Also, water content for 3D printing mixes can be reduced significantly by increasing the content of SHMP. As stated by authors, this effect can be explained by the dispersant's ability to deflocculate clay microstructures, reducing the interaction strength between clay particles. At the same time, increased sand contend leads to increasing of the printed structure's porosity, so curing conditions and the presence of negative environmental factors should be thoroughly studied.

In conclusion it worth to mention that all of researches emphasized the importance of rheological properties of the mixtures – both earth-based and cementitious – to the buildability and mechanical properties of printed structures. Currently in Ukraine, related to the rheology of the mixes – pastes and mortars - regulatory framework (DSTU) limited to terms and definitions,

with no methodology recommended. Along with the overall lack of the national and international standards of additive manufacturing in construction, it cause serious impediments in the technology development and implementation in real-scale construction projects.

1. Giridhar, Greeshma & Prem, Prabhat & Kumar, Shankar. (2023). Development of concrete mixes for 3D printing using simple tools and techniques. *Sādhanā*. 48. 10.1007/s12046-022-02069-w.

2. Hanifi, Hassan. (2024). Advantages and Challenges of 3D Printing Technology in Sustainable Construction Projects. 2nd International Congress on Science, engineering & New Technologies July 11, 2024 | Hamburg, Germany. <https://www.researchgate.net/publication/382360409>

3. Ramezani, Amir & Modaresi, Shahriar & Dashti, Pooria & Givkashi, Mohammad Rasul & Moodi, Faramarz & Ramezani-pour, Ali. (2023). Effects of Different Types of Fibers on Fresh and Hardened Properties of Cement and Geopolymer-Based 3D Printed Mixtures: A Review. *Buildings*. 13. 10.3390/buildings13040945.

4. Ghosh, Bittu & Karmakar, S. (2024). 3D Printing Technology and Future of Construction: A Review. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 1326. 012001. 10.1088/1755-1315/1326/1/012001.

5. Silva Mondragón, Guido & Burgos, Valeria & Ñañez, Robert & Kim, Suyeon & Ruiz, Gaby & Pando, Miguel & Aguilar, Rafael & Nakamatsu, Javier. (2023). Soil-Cement Matrices for Additive Construction: 3D Printing System Validation and Printing Tests. *Materials Science Forum*. 1093. 143-150. 10.4028/p-sC9yI5.

6. A. Perrot, Damien Rengeard, E. Courteille. 3D printing of earth-based materials. Processing aspects. *Construction and Building Materials*, 2018, 172, pp.670-676. 10.1016/j.conbuildmat.2018.04.017.hal-01833252.

7. Bhusal, Shiva & Uviña, Francisco & Hojati, Maryam. (2022). Preliminary study on 3D printing of locally available earthen materials in New Mexico. <https://www.researchgate.net/publication/365945674>

8. Zavaleta, Diana & Ñañez, Robert & Silva Mondragón, Guido & Kim, Suyeon & Ruiz, Gaby & Pando, Miguel & Nakamatsu, Javier & Aguilar, Rafael. (2023). Evaluation of Chitosan and Potato Starch as Stabilizers to Improve the Mechanical and Water Durability Properties of Printable Earth-Based Matrices Reinforced with Sisal Fibers. *Materials Science Forum*. 1093. 151-159. 10.4028/p-knYma7.

9. Gonzales, Betty & Zavaleta, Diana & Bertolotti, Bruno & Aguilar, Rafael & Pando, Miguel & Nakamatsu, Javier & Kim, Suyeon & Silva Mondragón, Guido. (2024). Comprehensive Investigation into the Influence of Soil Composition and Water Content on Cracking Due to Drying Shrinkage in 3D-Printed Earthen Structures. 10.1007/978-3-031-62690-6_3.

Секція 5.

НОВІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ

ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ СКЛА У ВИРОБНИЦТВІ БЕТОНУ

Бердник О.Ю., Виговський С.В.

(Київський національний університет будівництва і архітектури,
м. Київ)

Abstract. Reuse and recycling are considered the only way to reduce waste generation. The use of waste in the construction industry makes it possible to introduce new technologies and solutions to environmental aspects in this area and create new eco-friendly building materials.

Keywords: mortar properties, microstructure, compressive strength, cement, concrete, pozzolanic reactivity, waste glass powder, cement replacement.

Бетон є одним з найбільш широко використовуваних будівельних матеріалів у світі. Проте виробництво портландцементу, важливої складової бетону, призводить до значного викиду CO₂, парникового газу. На виробництво однієї тони портландцементного клінкеру припадає приблизно одна тонна CO₂ та інших парникових газів (ПГ). Рівень вуглекислого газу в атмосфері зріс майже на 30% за останні 200 років [1].

Екологічні проблеми відіграють важливу роль у сталому розвитку цементної та бетонної промисловості. Деякі промислові відходи, такі як зола виносу, керамічні відходи, порошок мармуру, доменний шлак тощо, вже знайшли своє застосування в бетоні. Останні дослідження показали, що відходи скла можуть бути ефективно застосовані у бетоні як пуцолановий компонент. В бетонній промисловості зроблені дослідження, які показали доцільність застосування порошку відходів скла як часткову заміну цементу [2].

Тонкодисперсний скляний порошок виявляє пуцоланові властивості, оскільки містить SiO₂, а отже, може замінювати цемент у бетоні та сприяти підвищенню набору міцності. Дослідження показали, що саме частки менше 75 мкм можуть виявляти пуцоланову активність, тим самим покращуючи мікроструктуру пасти та фізико-механічні властивості бетону в довгостроковій перспективі. Аморфний кремнезем у склі розчиняється в лужному середовищі цементного розчину. Після цього він може реагувати з гідроксидом кальцію (СН) для утворення вторинного

гідратованого кальцієвого силікату (C-S-H), процес відомий як пуцоланова реакція, яка може бути виражена за допомогою $\text{CH} + \text{S} + \text{H} \rightarrow \text{C-S-H}$. Пуцоланова активність часток скла збільшується завдяки більшій поверхні, доступній для реакції. Згідно з попередніми роботами авторів [3], розширення ASR у розчині, що містить частки скла у вигляді дрібних заповнювачів, буде незначним, за умови, що частки скла менше 0,3 мм.

На ранніх строках тверднення порошок скла діє лише як інертний матеріал, що спричиняє зниження міцності при стиску. Збільшення міцності при стиску на пізніших строках тверднення розчину з додаванням скло-порошку може бути пов'язане з пуцолановою активністю порошку скла. Пуцоланова реакція реактивного оксиду кремнію у скляному порошок та гідроксиду кальцію призводить до утворення фаз C-S-H, що призводить до ущільнення мікроструктури цементної матриці і, відповідно, до збільшення міцності при стиску розчину. Ущільнення мікроструктури показано на рис. 1.

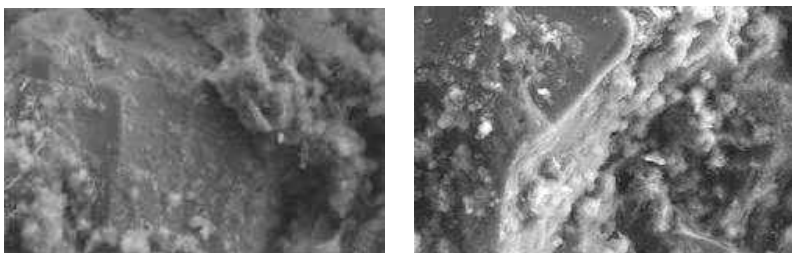


Рис. 1. Кристалізація фаз C-S-H на поверхні скляного порошку через 2 год (ліворуч) і через 12 год (праворуч) після гідратації

В результаті випробування було досліджено вплив добавки тонкодисперсного скло-порошку на гідратацію цементу на основі аналізу мікроструктури цементної матриці при ранніх стадіях гідратації. Також було помічено, що фаза C-S-H кристалізується на частинках скляного порошку (рисунок 1). Дуже дрібні частки скляного порошку діють як центри кристалізації і надають додаткову площу, де можуть осідатися ядра C-S-H. Таким чином, було зафіксовано незначне прискорення гідратації. Лицьова область, видима на поверхні зерна скла, є щільною і схожа на матрицю далеко від поверхні. Кристали гідроксиду кальцію або збільшеної місцевої пористості в області контактної зони не спостерігалися. На поверхні скла видно гетеронуклеїнові малі кристали гідратованих кремнієвих кальцитів.

Різницю в розподілі величини пор можна спостерігати у інших активно мінеральних добавках. Ми можемо стверджувати, що використання скляного порошку в розчині призводить до модифікації

розміру пор. Згідно з попередніх досліджень [4, 5], кількість капілярних пор зменшується, тоді як кількість загальної пористості збільшується. Це пов'язано з малими розмірами часток скла.

Досліджуваний скляний порошок виявляє незначну пуцоланову активність. Очікується, що збільшення питомої поверхні скляного порошку призведе до збільшення пуцоланової активності.

Додавання скляного порошку негативно впливає на міцність на ранніх стадіях твердіння, можливо це зумовлено недостатньою пуцолановою активністю у даний період. У більш пізньому віці спостерігається підвищення міцності при стиску розчину з додаванням скляного порошку. Це головним чином пов'язано з пуцолановою активністю тонко-дисперсного скляного порошку, яка виявляється у більш пізній період [6, 7].

Негативного впливу на мікроструктуру в зовнішній області не спостерігалось. Зерно скла діє як центри гетеронуклеації кристалів C-S-H.

Подрібнений відход скла може бути використане як часткова заміна цементу. У цьому випадку спостерігається незначне збільшення міцності при стиску випробувальних зразків і відсутність погіршення пористості. Для більш ефективного використання необхідно подрібнювати його до більш дрібного розміру, до конкретної поверхні, яка не менша за цементу. Тоді пуцоланова активність скла буде збільшена.

1. Runova R.F. Konstruktsiini materialy novogo pokolinnya ta tehnologii ih uprovadzhennya v budivninsvo / Runova R.F., Gots V.I., Nazarenko I.I. ta inshi.- Kiev, 2008 – 360 s.

2. DSTU B.V. 2.7-171:2008. (EN 934 – 2:2001, NEQ). Budivelny materialy. Dobavky dlya betoniv I budivelnych rozciniv. Zagalni technichni umovy.

3. Volodymyr Gots, Oksana Berdnyk, Oles Lastivka, Alla Maystrenko, Nataliya Amelina. Corrosion of basalt fiber with titanium dioxide coating in NaOH and Ca(OH)₂ solutions. *AIP Conf. Proc.* 2490, 050010 (2023). <https://doi.org/10.1063/5.0122739>.

4. Gots V.I., Lastivka O.V., **Berdnyk O.Yu.**, Tomin O.O., Shilyuk P.S. Corrosion resistance of polyester powder coatings using fillers of various chemical nature. – *Key Engineering Materials.*–Vol.864.115-121.

5. Chikhalikar S.M. and Tande S.N. (2012) “An Experimental Investigation On Characteristics Properties of Fibre Reinforced Concrete Containing Waste Glass Powder as Pozzolona” 37th Conference on OurWorld in Concrete and Structures, Singapore, August.

6. Nathan Schwarz, Hieu Cam, Narayanan Neithalath, Influence of a fine glass powder on the durability characteristics of concrete and its comparison to fly ash, *Cement & Concrete Composites*, 2008, Vol.30, pp.486-496.

7. Du, H. and Tan, K. H., (2014a). “Concrete with recycled glass as fine aggregates.” *ACI Materials Journal*, 111(1), 47-58.

СТІЙКІСТЬ ЕПОКСИДНИХ КОМПОЗИЦІЙ В АДСОРБЦІЙНО-АКТИВНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

Гара Ан. А., Кравченко К.Р.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** It was investigated the influence of multifractional mineral skeleton that includes zeolite and furfural on properties of miscellaneous filled compositions that intended in conditions of reaction of mixture of water with oil and other factors (in construction elements associated with technical exploitation of transport). Whereas it is almost impossible to implement the sustained research in such heterogeneous environments the properties of the compositions were measured after the exposure alone in water and two types of oil.*

***Keywords:** polymer solutions, epoxy rubber resin "Macro", water absorption of polymer composite materials.*

Для захисту бетонних конструкцій, що працюють у контакті з водою, нафтопродуктами та іншими агентами, потрібні матеріали підвищеної стійкості. Такі матеріали потрібні і для ремонтно-відновлювальних робіт, яких потребує більшість гідротехнічних споруд, що експлуатуються в Україні багато десятиліть. За комплексом властивостей виконання цих робіт можуть відповідати полімеррозчини на основі епоксидних смол. За високої первинної вартості епоксидних сполучних їх застосування виявляється виправданим за сумарними витратами життєвого циклу споруд, за рахунок скорочення витрат на ремонт і заміну конструкцій, ліквідацію наслідків відмов, екологічні та інші заходи. З урахуванням можливості регулювати властивості, підвищувати стійкість і довговічність та знижувати вартість цих матеріалів, використовуючи ті чи інші модифікатори та наповнювачі (з їхнього величезного різноманіття), актуальні розробки наповнених модифікованих епоксидних композицій, призначених для певних умов експлуатації.

Як базовий компонент композицій для ремонту та захисту бетонних конструкцій доцільно використовувати епоксикаучукову смолу «Макро», що виробляється в Україні. Поліпшенню експлуатаційних властивостей розчинів на цій смолі може сприяти запровадження певних дозувань фурфуролу та цеоліту (патент України №5408). Зокрема, оцінено [1] позитивну роль цеоліту у зниженні водопоглинання. Відомо [2], що алюмосилікат (кристалічну структуру якого утворюють тетраедричні фрагменти $[\text{SiO}_4]^{4-}$ і $[\text{AlO}_4]^{5-}$, об'єднаний загальними вершинами в тривимірний каркас) має властивості молекулярного сита. Однак причини та умови його позитивного впливу на структуру модифікованих фурфуролом епоксидних композицій (зокрема за критеріями адсорбції та стійкості у воді та нафтопродуктах) не зрозумілі.

В епоксидну смолу фурфурол вводять як органічний модифікатор, який здатний підвищити водо- та хімічну стійкість, адгезійні та міцнісні властивості матеріалу, а також служить прискорювачем полімеризації та певною мірою пластифікує склади.

В експерименті з визначення фізико-механічних та експлуатаційних властивостей [3] використовувався 27-ми точковий D-оптимальний план. Варіювалися рівні п'яти параметрів дисперсної системи. Для виявлення впливу на властивості системи компонентів дисперсної фази вони представлені серед факторів, що варіюються, ієрархією співвідношень – частками компонентів вкладених підсистем (а не окремими масовими частинами в дисперсійному середовищі, з урахуванням досвіду аналізу ролі цеоліту в [4]): мінеральний каркас – 280 ± 100 частин; частка у каркасі наповнювача – $0,6 \pm 0,3$ масових частин; частка цеоліту в наповнювачі – $0,16 \pm 0,10$ масових частин; частка великого цеоліту – $0,25 \pm 0,25$ масових частин; фурфурол – 7 ± 5 масових частин.

Тривала експлуатація полімерних композиційних матеріалів при постійному або періодичному контакті з агресивним середовищем (водою), як правило, призводить до змін їх властивостей. Адсорбційно-активні середовища, проникаючи в композит за рахунок дифузії та молекулярного перенесення за дефектами структури, сприяють підвищенню рухливості структурних елементів, знижують міцність міжмолекулярних зв'язків та полегшують тим самим «прослизання» молекулярних ланцюгів та молекулярних утворень щодо один одного, що проявляється у зниженні енергії, необхідної для руйнування матеріалу.

Серед характеристик, визначених для 27 композицій, було водопоглинання W (%) через 1, 3 і 6 місяців ($\tau = 30, 90, 180$ діб) перебування у воді. За цими даними для кожної композиції вдалося отримати (з прийнятною помилкою) аналітичні залежності W від часу одного і того ж експоненційного виду (1) і відповідні рівняння швидкості водопоглинання (2).

$$W = a \cdot (1 - \exp[-b \cdot \tau]) \quad (1)$$

$$dW/d\tau = a \cdot b \cdot \exp[-b \cdot \tau] \quad (2)$$

Параметр a у моделях (1-2) відповідає максимальній кількості води, що поглинається полімеррозчином, b – показник темпу набору води.

Отримані моделі дозволяють оцінити для досліджуваних складів водопоглинання та його швидкість будь-якої миті часу. Зокрема можна прогнозувати W після року перебування у воді.

За такими оцінками, за рівнями параметра a , темпу b та інших узагальнюючих показників кінетики водопоглинання можна порівнювати композиції під час аналізу та проектування якості матеріалу.

Порівняльний аналіз кривих водопоглинання різних композицій показує, що найбільш помітний вплив на цей процес має вміст фурфуролу. Причому нижчий рівень водопоглинання за будь-яких термінів експозиції відповідає середньому дозуванню.

Слід зазначити, що ці дані показали слабкий кореляційний зв'язок W_6 із щільністю ($r = 0.48$).

При аналізі ЕС-моделі, що описує повне поле водопоглинання в координатах всіх п'яти параметрів складу встановлено, що мінімальний рівень цього поля $W_{6-\min} = 0.009\%$, при $x_1 = +1$ (максимальне наповнення мінеральним каркасом), $x_2 = x_3 = -1$ (мінімум наповнювача та мінімальна частина в ньому цеоліту), $x_4 = 1$ (максимальна кількість у цеоліті великих зерен), $x_5 = -0.07$ (середнє дозування фурфуролу). 0.60 (середній рівень модифікації цеолітом з підвищеним вмістом великих зерен) та $x_5 = +1$ (багато фурфуролу).

Серед інших характеристик визначалося нафтопоглинання P модифікованих епоксидних розчинів після 6-ти місячної експозиції в «легкій» і «важкій» нафти (P_L і P_H) згідно з планом п'яти-факторного натурального експерименту. поглинання легкої нафти. Виявлено відсутність лінійної P_L , P_H та відповідними рівняннями водопоглинання.

Значна негативна кореляція виявлена між поглинанням води і легкої нафти максимально наповнених композиціях, $r\{P_L, W\} = 0.58$).

Експеримент загалом виявив позитивний вплив цеоліту, особливо для жорстких розчинів (зі зниженою витратою смоли). У таких композиціях з підвищеним наповненням мінеральним каркасом фурфурол істотно знижує поглинання нафти.

1. Ляшенко Т.В., Довгань А.Д., Гара Ан.А., Шаршунов А.Б., Подагеліс І. Моделирование и анализ влияния минеральных компонентов эпоксидного композита на его водопоглощение / междуна. сем. по моделированию и оптимизации композитов МОК'44. Одесса: Астропринт, 2005. С. 5-8

2 Smith J.V. Structural classification of zeolites / Mineral. Soc. Am. Spec. Paper. 1963. №1. P. 281-290.

3. Гара Ан.А. Анализ свойств эпоксидных композиций, предназначенных для защиты и ремонта строительных конструкций / Вісник ОДАБА. – Одеса, 2013. Випуск № 49. С. 26-31.

4. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Довгань А.Д., Гара Ан.А. Анализ полей свойств для доказательства специфической роли тонкомолотого цеолита в эпоксидных композитах. / Вісник ОДАБА №15. Одесса: Місто майстрів, 2004. С.54-61.

**ДОСЛІДЖЕННЯ СТАБІЛЬНОСТІ ЕТРИНГІТОВОЇ ФАЗИ
НАНОМОДИФІКУВАННЯМ ЦЕМЕНТНИХ СИСТЕМ
В УМОВАХ ДІЇ РІЗНИХ ФАКТОРІВ**

Дерев'янюк В.М., Гришко Г.М., Смолін Д.О., Ватажишин О.В.
(Український державний університет науки і технологій,
Навчально-науковий інститут «Придніпровська державна академія
будівництва та архітектури», м. Дніпро)

Abstract. The issue of stabilizing the ettringite phase under various factors has been resolved through nanomodification. The research results confirm changes in the mineral structure and a 4-5 fold increase in strength indicators, as well as variations in the softening coefficient depending on the type of nanomodifier and systems with different plasticizers and nanotubes.

Keywords: ettringite; ettringite phase stabilization; aluminate cements; sulfoaluminate cements; modification; additive

Постановка проблеми. В будівництві для виготовлення виробів, матеріалів, спеціальних розчинів широко використовуються цементи з особливими властивостями. До групи таких цементів належать алюмінатні та сульфоалюмінатні цементи. Одним із видів алюмінатних цементів є глиноземистий цемент, виробництво якого відсутнє в Україні, але певною альтернативою вирішення проблеми виробництва в'язучих такого класу можливе шляхом використання **гіпсоглиноземистих, гіпсошлакових цементів**. Це дасть змогу прискорити темпи виробництва будівельних виробів та ремонту пошкоджених залізобетонних споруд, створення гідроізоляції та іонозахисних покриттів, будівництва дорожнього полотна, аеродромних самонапружних плит, тощо.

Однако, широке використання гіпсоглиноземистих, гіпсошлакових та інших в'язучих речовин такого типу обмежується нестабільністю структури. Алюмінати кальцію, в хімії цементів відомі як дві серії фаз AFm и AFt, які є моно- або тризаміщені двухвалентними типами аніонів: еtringіт – це $C_3A \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$ (в деяких джерелах $31H_2O$), сульфоалюмінатна AFt-фаза, (ТГСАК – тригідросульфоалюмінат кальцію) та низькосульфатна форма гідросульфоалюмінату кальцію (МГСАК) - $3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$.

В гіпсоглиноземистих, гіпсошлакових цементах основною фазою яких є еtringіт, при дії зовнішніх джерел (температура, вологість, агресивне середовище та інші фактори експлуатації) може відбуватись перетворення еtringіта (AFt) в AFm і навпаки. Це в багатьох випадках приводить до руйнування виробів і стримує розвиток технологій будівельного виробництва даного напрямку [1-2].

Але проблема стабілізації еtringітової фази вирішена не повністю, що стримує створення перспективного ряду композиційних цементів. Вирішення даної проблеми стає можливим завдяки розробки в'язучого у якому відсутні чинники нестабільності еtringітової фази. Тому, дослідження по стабілізації еtringітової фази та розробка композиційних в'язучих речовин системи $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SO}_3$ є досить актуальними.

Мета роботи. Стабілізація еtringітової фази сульфо-алюмінатних цементів за рахунок наномодифікування.

Основна частина. В дослідженнях приділяється увага стабільності еtringітової фази гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %). В якості алюмінатної системи використано глиноземистий цемент ГЦ-40, а сульфатів – гіпс Г5. Стабілізацію проводили після дослідження впливу ПАР наномодифікаторами – тауритом, діоксидом кремнію, нанотрубками, SiC. В якості пластифікаторів були використані наступні добавки: Sika Viscocrete G, MC Баухемі 2695, Стахема STP 156. Найменше зниження В/Т та найкращі показники основних фізико-механічних та технологічних властивостей досягаються з використанням добавки Sika Viscocrete G: В/Т для складу гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %) становить 0,27 в порівнянні з 0,32 без пластифікатора, міцність на стиск та згинання – 19 МПа та 14 МПа відповідно.

В композиціях з гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %) через три доби твердіння з'являються основні міжплощинні відстані і інтенсивності гідратних фаз $\text{C}_3\text{AS}_3\text{H}_{32}$ ($d/n = 0,973; 0,561; 0,388; 0,348; 0,256$ нм) (рис. 1). Спостерігаються лінії $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$ ($d/n = 0,423; 0,266; 0,246; 0,238; 0,212; 0,168$ нм), $\text{Ca}_4\cdot\text{Al}_2(\text{OH})_{14}\cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ($d/n = 0,463; 0,255; 0,176; 0,151$ нм) (рис. 1).

В процесі твердіння через 3 доби з'являються інтенсивність ліній еtringіту та гелю гідрооксида алюмінію зростає, що підтверджує інтенсифікацію процесу гідrataції (рис. 1 б).

В результаті модифікування нанодобавками досягнуто збільшення міцних показників композиційних матеріалів на основі гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %) +0,18 % Нанотрубок+0,4 % Sika до - 70,2 МПа в порівнянні з 14,67 МПа

еталонного складу гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %) +0,75 % Таурита+0,4 % Sika до 66,40 МПа та гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %) +1,0 % діоксиду кремнію+0,4 % Sika до 60,73 МПа. Коефіцієнти розм'якшення відповідно збільшуються при модифікуванні нанотрубками – до 1,16; тауритом – до 1,02; діоксидом кремнію – до 1,07.

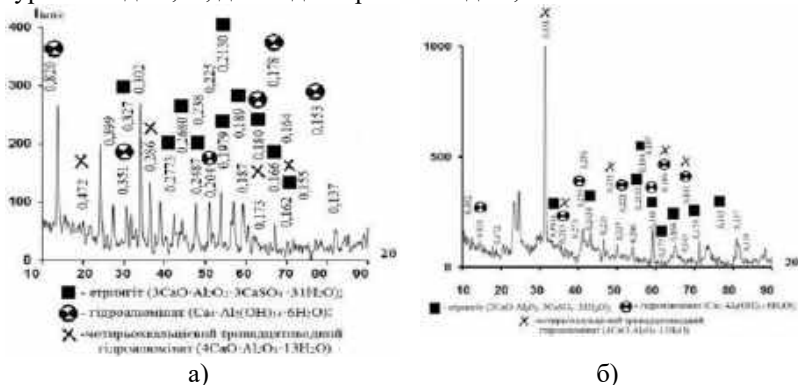


Рис. 1. Рентгенівські дифрактограми зразків, виготовлених з композиції на основі гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %) на 3 добу твердіння (а) та на 28 добу твердіння (б).

Встановлені фактори впливу на стабільність еtringіту двох форм утворення: а- на основі чистих мінералів $C_3A + C_3S \cdot H_2$; б - гіпсоглиноземистого розширеного цементу від зміни вологості та рН середовища, температури, умов експлуатації. Так, утворення еtringіту, що відбувається в перші терміни твердіння з високою швидкістю забезпечує ріст міцності каменю: еtringіт з голчастими кристалами, забезпечує хороше армування структури цементного каменю; гель гідроксида алюмінію сприяє зниженню внутрішніх напружень при рості кристалів за рахунок більш еластичних зв'язків з кристалами. В результаті чого структура твердіння зберігає високу міцність і цілісність в процесі збільшення кристалічних фаз. Найбільш високий ефект досягається під час одночасного використання $C_6A_3S_3H_{32}$ і AlH_3 , що має місце при гідратації $C_4A_3S_3$.

Проведено стабілізацію еtringітової фази за рахунок наномодифікування: вуглецевими нанотрубками (ВНТ), тауритом, діоксидом кремнію. За рахунок наномодифікаторів, які мають питому поверхню 80-100 м²/г відбувалися: 1) Збільшення центрів кристалізації частини мінералу, що гідратується за розчинною схемою; 2) Зміна швидкості процесу гідратації; 3) Зміна структури мінералів, що дає можливість цілеспрямовано отримувати структуру з заданими

властивостями. Проведені результати досліджень підтверджують збільшення в 4-5 разів міцних показників, зміну коефіцієнту розм'якшення в залежності від виду наномодифікатора та систем з різними пластифікаторами та нанотрубками. Визначений оптимальний вміст сульфат іонів в гіпсоглиноземистому розширеному цементі (ГЦ:Г (70:30) %) (складів композицій з максимальним вмістом еtringіту), що дає можливість управляти структурою та властивостями в'язучих речовин. Експериментально підтверджено оптимальний вміст сульфату кальцію (в межах 30-40% від маси композиції) позитивно впливаючого на кількість утворення еtringіту.

Гідрофобізація сульфатів кальцію алюмінатними елементами дає можливість використання будівельного гіпсу в умовах відносної вологості більше 60%. Отримано комплекс експериментально-статистичних моделей наномодифікованих композицій на основі гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %), що дають можливість визначення впливу вхідних факторів на зростання основних фізико-механічних властивостей. Розроблена математична модель модифікування композицій на основі гіпсоглиноземистого розширеного цементу (ГЦ:Г (70:30) %), модифікована ультра- і нанодобавками, ПАР, яка дозволяє управляти структурою твердочої системи і одержувати гіпсоглиноземисті композити з заданими властивостями.

Висновок. На основі методів планування ПФЕ і проведення експериментальних досліджень розроблено ряд експериментально-статистичних моделей, визначено ряд складів розчинів на основі гіпсоглиноземистого розширеного цементу, що містять максимальну кількість еtringіту: 17,1 % глиноземистого цементу, 7,32 % гіпсу, 0,4 % пластифікатору, 0,18 % нанотрубок, 75 % піску та забезпечують міцність системи в 40,2 МПа. Оптимальним складом, який забезпечує міцність системи в 37,8 МПа являється 16,7 % глиноземистого цементу, 7,15 % гіпсу, 0,4 % пластифікатору, 0,75 % тауриту та 75 % піску. Зразків з діоксидом кремнію, оптимальний вміст якої становить 1% має міцність системи 42,8 МПа являється 16,52 % глиноземистого цементу, 8,48 % гіпсу, 0,4 % пластифікатору, 1 % тауриту та 75 % піску.

1. Дерев'яно В. М., Гришко Г. М., Ватажишин О. В. Оцінка ефективності впливу ультра-та нанодисперсних добавок для модифікації сульфатних і сульфоалюмінатних фаз // Український журнал будівництва та архітектури. 2023. №. 4 (016). С. 71-76.

2. Beskopylny, A.N.; Stel'makh, S.A.; Shcherban', E.M.; Mailyan, L.R.; Meskhi, B.; Smolyanichenko, A.S.; Beskopylny, N. High-Performance Concrete Nanomodified with Recycled Rice Straw Biochar. *Appl. Sci.* 2022, 12, 5480. <https://doi.org/10.3390/app12115480>

КОМПОЗИЦІЙНІ БЕТОНИ З ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ

Дехта Т.М., Бондаренко С.В., Василенко С.В.

(Український державний університет науки і технологій
ННІ «Придніпровська державна академія будівництва
та архітектури», м. Дніпро)

***Abstract.** Theoretical and experimental studies have shown that the technology of vibration vacuuming is an effective method of compaction of ash-slag composite concrete in comparison with the traditional method of vibration compaction. Compaction of concrete mixtures using a vibrating vacuum makes it possible to significantly increase the density, strength, frost resistance and other properties of concrete.*

***Keywords:** composite concrete, compaction, vacuuming, fly ash.*

Основний текст. Запропоновано спосіб поліпшення якості золю шлакового вакуумованого бетону за рахунок добавки деякої кількості електроліту в бетонну суміш при її приготуванні. Досліджено основні властивості вібраційно ущільнених і вібраційно вакуумованих бетонів на основі відходів, проведена порівняльна оцінка цих властивостей, яка показала переваги вакуумованих композиційних золю шлакових бетонів.

Приклад використання вакуумної технології ущільнення бетону наведено в роботі [1, 2]. Однак при використанні легких бетонів, вони мають тенденцію до руйнування через високий тиск при вакуумуванні. Подальші дослідження використання техногенної сировини базувались на отриманні важких золю шлакових бетонів.

Незначні обсяги і низька ефективність використання золи на будівельних підприємствах, малі обсяги використання відходів не дозволяють проектувати на теплових електростанціях маловідходні і безвідходні технології. Недоліки золю шлакових сумішей менше проявляються при використанні їх в гідротехнічному будівництві, де клас бетону визначається у віці 180 діб. На більшості підприємств

будівельної індустрії при приготуванні бетонів для громадського, промислового і сільськогосподарського будівництва цей напрям виявився малоефективним, і зола-виносу практичного застосування не знайшла [3]. Неоднорідний склад золи ТЕС є одним з найбільших недоліків, які скорочують її використання. При високому вмісті крупних частинок золи-виносу (більш 0,045 мм), а також при збільшенні вмісту незгорілих частинок вугілля потреба в воді зростає. Це призводить до розшарування бетонної суміші при ущільненні. А також до зменшення фізико-механічних властивостей зола бетонів, зниженню довговічності виробу та конструкцій [3].

Оскільки зола-шлакові суміші становлять основну частину відвалів більшості теплових електростанцій, що спалюють пиловидне паливо, вони представляють особливий інтерес для підприємств будівельної індустрії, в якості заповнювача для бетону. Зростаючі запаси цієї сировини можуть значно знизити існуючий дефіцит наповнювачів бетону [4].

Введення золи в якості традиційного заповнювача бетону і використання вібраційної вакуумної обробки дозволили оптимізувати склад бетону.

Зерна пиловидної золи – це крихітні частинки розміром від декількох мікрон до 0,14 мм. Велика частина зерен ошлакована і округла. Частина зерен відшліфована лише зовні – під склоподібною оболонкою знаходяться мінерали, які не встигли розплавитися під час згорання пилоподібного вугілля в печі. Структура самого зерна обумовлена його скороченим перебуванням у зоні високих температур. В результаті швидкого підвищення температури майже одночасно відбувається вигорання органічних речовин, що містяться у вугіллі, і спікання мінеральної частини. Газ, що виділяється під час цього процесу, спучує розплав. Різке охолодження зерен стабілізує склоподібну фазу. В результаті частинки пилоподібної золи є розплавленими зернами, багато з яких мають крихітні, переважно закриті пори.

Шлаки представляють собою склоподібні зерна розміром 0,3...20 мм неправильної форми з гострими кутами. Значна частина зерен має пори різних розмірів, які утворилися під дією пари при попаданні вогненно-рідкого шлаку до води. Іноді зустрічаються включення шлаку - розміром до 40 мм. Хімічний склад зола-шлакових сумішей наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Хімічний склад золошлакових сумішей ТЕС

Вид відходів	Склад оксидів, %							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO+ Fe ₂ O ₃	TiO ₂	CaO	MgO	SO ₃	В.п.п.
Зола	41...53	15...22	5...9	0,5	3...4	1...1,6	0,4...0,8	10...14
Шлак	48...56	20...28	9...13	0,5	4,5...5	1...1,6	0,5...0,6	0...1

Для приготування бетонних сумішей використовували наступні матеріали:

- шлакопортландцемент М400 (м. Кривий Ріг) (ДСТУ Б В.2.7-46-2010);
- зола-виносу Придніпровської ТЕС (ДСТУ Б В.2.7-205:2009);
- вода водопровідна (ДСТУ Б В. 2.7.-273:2011);
- електроліт - CaCl₂ (ДСТУ Б В.2.7-175:2008. ДСТУ Б В.2.7-69-98).

Бетонні суміші готували з однаковою рухливістю, яка характеризується осіданням стандартного конуса – ОК = 5...6 см.

Результати досліджень [4, 5] вказують на високу потребу у воді зола бетонних сумішей. Це, на наш погляд, є основною причиною низької міцності зольного бетону при помірних витратах цементу.

Спочатку визначали ефективність вібраційно вакуумної обробки звичайних зола бетонних сумішей (без додавання електроліту). В цих дослідженнях використовували бетонну суміш із витратою цементу 280 кг/м³. Зразки 15×15×7 см формували за допомогою вібраційного вакуумування (з метою зменшення впливу масштабного фактору). Попереднє ущільнення бетонної суміші у формах проводили вібраційним методом протягом 7...10 с. Потім ці зразки піддавали вакуумуванню до припинення видалення надлишків води для замішування. Величина вакууму становила 0,7 (загальний вакуум приймався за одиницю). Під час вакуумування проводили періодичну вібрацію тривалістю 8...10 с кожні 1,5...2 хвилини (виконували два прийоми вібрації) [3-5].

При підборі раціональних складів бетонних сумішей для вакуумної обробки визначена оптимальна рухливість вихідної бетонної суміші, яка обумовлює найбільш компактне розміщення складових в процесі вакуумування (найбільшу щільність). Така рухливість суміші зростає при зниженні витрати цементу (з ОК = 1...2 см до 5...7 см).

Результати досліджень основних властивостей вібраційно вакуумованих зола шлакових композиційних бетонів підтвердили що, міцність зола шлакового вакуумованого бетону в середньому вище

міцності вібраційно ущільненого бетону з рухомих сумішей на 6...10 МПа, або на 60...100 % (в залежності від витрати цементу).

Завдяки розробці технології вібраційно вакуумованих виробів на основі відходів надається можливість використовувати існуюче технологічне обладнання без принципових конструктивних змін, здійснювати негайне розпалублення відформованих виробів, що суттєво зменшує металоємність виробництва [6, 7].

1. Mariusz Holtzer, Rafał Dańko, Angelika Kmita, Dariusz Drożyński, Michał Kubecki, Mateusz Skrzyński, Agnieszka Rocznik (2020). Environmental Impact of the Reclaimed Sand Addition to Molding Sand with Furan and Phenol-Formaldehyde Resin-A Comparison // *Materials*, Vol. 13, P. 4395. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/19/4395>

2. Sang-Yeop Chung, Pawel Sikora, Dietmar Stephan, Mohamed Abd Elrahman (2020). The Effect of Lightweight Concrete Cores on the Thermal Performance of Vacuum Insulation Panels // *Materials*, Vol. 13, P. 2632. <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/11/%202632>

3. Сторожук Н.А., Павленко Т.М., Аббасова А.Р. Незаслуженно забытый способ уплотнения бетонных смесей. *Технологии бетонов*, 2018. № 1-2. С. 27-31.

4. Сторожук, Н. А., Павленко Т. М., Аббасова А. Р. Основы теории формирования структурной прочности вакуумбетона при уплотнении бетонных смесей. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2020. №81. С. 139-148.

5. Tatyana Dekhta / Experimental Investigation and Theoretical Background of the Optimal Control of the Concrete Mixture Forming // Pavlo Pshinko, Olena Hromova, Oksana Steinbrech; *Komunikácie - vedecké listy Žilinskej univerzity v Žiline / Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*. – Slovakia, №2, 2023. P. D39 – D42; DOI: 10.26552/com.C.2023.034 <https://komunikacie.uniza.sk/contents/csl/2023/02.pdf>

6. Дехта Т. М., Шпирько М. В., Бондаренко С. В., Василенко С. В. Будівельне матеріалознавство: навчальний посібник. Дніпро: ДВНЗ «ПДАБА», 2022. 115 с. ISBN 978-966-323-229-4.

7. Дехта Т. М. Системний аналіз в технології будівельних матеріалів / О.В. Штайнбреш, // *Матеріали Всеукраїнської науково-методичної конференції Проблеми математичного моделювання – Кам'янське, 27-28 травня, ДДТУ, 2020. С. 97-98.* https://docs.google.com/document/d/1Ju4wT6k4xtkU0sR2-bS-VGfLWi_F3Wamf6XdKYfngd0/edit

ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНУ МЕТОДОМ ПРУЖНОГО ВІДСКОКУ

Кочкаръов І.Д., Савицький В.В.

(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

***Abstract.** The article examines the issue of determining the strength of materials of natural structures by the method of elastic rebound using the Schmidt hammer. The obtained values were checked on control samples in laboratory conditions by direct tests with a hydraulic press.*

***Keywords:** Schmidt's hammer, elastic rebound method, monolithic concrete, ceramic brick, graduated dependencies, approximation.*

У більшості випадків при обстеженні конструкцій будівель і споруд використовують неруйнівні методи визначення міцності матеріалів.

Найбільш поширеним є метод пружного відскоку [1, 2] через відносну легкість у використанні та достатньої точності, яка становить близько 10-15%. Цей метод найчастіше використовується під час зведення або реконструкцій будівель та споруд [3].

Мета роботи полягає у встановленні градувальних залежностей визначення міцності матеріалів молотком Шмідта, а також оцінці їх достовірності.

Було заплановано провести визначення міцності матеріалів натурних конструкцій методом пружного відскоку за допомогою молотка Шмідта, а також виконати перевірку отриманих значень на контрольних зразках у лабораторних умовах прямими випробуваннями гідравлічним пресом на стиск. Визначення міцності на стиск було проведено для монолітного бетону. Випробування проводились на будівництві житлових багатоквартирних будинків у м. Рівне. За допомогою молотка Шмідта попередньо була визначена міцність бетону несучих балок покриття та цегли зовнішніх (рис. 1).

Балки покриття мали розмір поперечного перерізу 250×500 мм. Випробування проводилось на 10 добу після заливки бетону у опалубку. Також для контролю набору міцності бетону несучих балок покриття, були виготовлені контрольні зразки у формі кубиків розміром 100×100×100 мм (рис. 2).



Рис. 1. Натурна балка покриття, для якої проводилось визначення міцності бетону



Рис. 2. Контрольні зразки

Випробування за допомогою молотка Шмідта проводилось за двома методиками. За першою методикою поверхня дослідних балок не шліфувалась. Друга методика передбачала попереднє шліфування поверхні перед випробуванням.

За обома методиками наносилось десять ударів по боковій поверхні балок (Положення молотка № 1 за інструкцією). Відстань між місцями ударів приймалася не менше 30 мм. Поверхня після шліфування показана на рис. 3. У подальшому експериментальні точки були відбраковані за методикою наведеною у ДСТУ-Б-В.2.7-226:2009. У той же день були випробувані контрольні зразки на пресовому обладнанні.

Отримані значення відскоку ударного механізму були нанесені на градувальний графік, побудований за паспортними даними (рис. 4).



Рис. 3. Поверхня після шліфування

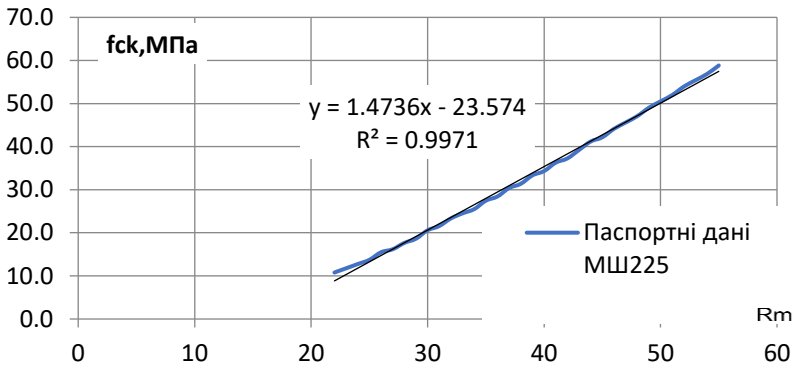


Рис. 4. Градувальний графік за паспортними даними приладу

На цьому ж графіку було нанесено експериментально отримане середнє значення міцності бетону контрольних зразків (рис. 5).

Далі було визначено значення міцності бетону на стиск f_{ck} за градуйованим графіком (паспортними даними) для поверхні балки за двома методиками. За першою методикою (без шліфування) отримали значення $f_{ck1} = 15.2$ МПа. За другою отримали $f_{ck2} = 12.4$ МПа. Середнє значення міцності бетону, отримане за контрольними зразками, складає $f_{ck2} = 14.7$ МПа, що дозволило знайти похибки за отриманими даними.

Похибка за першим методом (без шліфування) у порівнянні зі значенням, отриманим за контрольними зразками, складала:

$$\Delta = \frac{14.7 - 15.2}{14.7} 100\% = 3\%.$$

Похибка для другого методу (з шліфування) складала:

$$\Delta = \frac{14.7 - 12.4}{14.7} 100\% = 15\%.$$

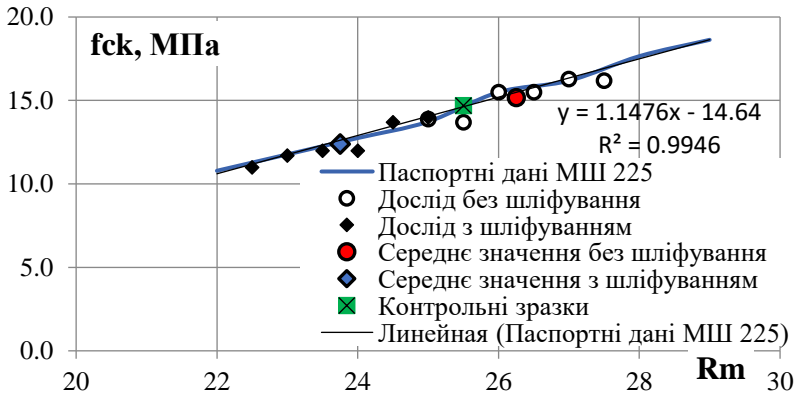


Рис. 5. Експериментально отримане середнє значення міцності бетону контрольних зразків

Згідно з отриманими результатами бачимо, що перший метод має найменшу похибку, подібну до контрольних зразків. З цього можна зробити висновок, що шліфування поверхні призвело до зменшення пружного відскоку.

Користуватися градуйованим графіком не завжди є доволі зручно, тому нами було виконано його апроксимацію прямою залежністю у діапазоні від 20 до 30 умовних одиниць, отримане рівняння представлено нижче:

$$fck = 1.15 \times R_m - 14.64 \quad (1)$$

де fck – міцність бетону

R_m – значення відскоку ударного механізму

Коефіцієнт варіації отриманого рівняння складає 0,9946, що вказує на достатню точність проведеної апроксимації. Формула (1) виражає залежність між міцністю бетону та пружним відскоком.

Висновок. В роботі було встановлено градуйовані залежності міцності бетону, на основі яких виконано апроксимацію прямою залежністю та отримання їх рівняння. За допомогою цього було встановлено, що прилад має невелику похибку при вимірюванні на поверхні без шліфування та більшу при використанні шліфувального каменю, але при цьому похибка задовольняє вказані межі у 10-15%.

1. Караван В.В. Метрологія і стандартизація. Навчальний посібник. Рівне: НУВГП, 2011. 101 с.

2. Ромашко В.М. Діагностика та відновлення будинків і споруд. Рівне: НУВГП, 2011. 287 с.

3. Бабич Є.М., Караван В.В., Бабич В.Є. Діагностика, паспортизація та відновлення будівель і інженерних споруд. Рівне: Волинські обереги, 2018. 176с.

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ
ПАРАМЕТРІВ РОБОТИ ЗБІРНО-МОНОЛІТНИХ
НЕРОЗРІЗНИХ ЗАЛІЗОБЕТОННИХ БАЛОК
ЗА ДІЇ ПОВТОРНИХ НАВАНТАЖЕНЬ**

Савицький В.В.

(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

***Abstract.** Experimental studies were performed in order to establish the features of prefabricated monolithic continuous two-span reinforced concrete beams with pre-stressed joints under the action of single and repeated (low-cycle) loads.*

***Keywords:** prefabricated-monolithic constructions, reinforced concrete beams, pre-stressed joints, repeated loads, support reactions, flight and support moments, stress-strain state, deflections, width of cracks opening.*

Збірно-монолітні конструкції мають низку переваг порівняно зі збірними та монолітними конструкціями. Стосовно збірно-монолітних балок, то вони можуть об'єднуватися в нерозрізні завдяки влаштуванню стиків на опорах, які здатні сприймати згинні моменти.

Залізобетонні нерозрізні балки широко використовуються при зведенні різних будівель і споруд. Відомо, що нерозрізні балки в складі перекриттів можуть піддаватись малоцикловим (повторним) навантаженням, а інколи і перевантаженням, які можуть суттєво вплинути на перерозподіл зусиль з опорних (збірно-монолітних) перерізів на пролітні, або навпаки. Цей перерозподіл змінює напружено-деформований стан конструкцій, їх міцність і жорсткість. Крім того, попереднє напруження стиків підвищує тріщиностійкість в опорній зоні балок і впливає на роботу конструкції в цілому.

Автори [1] досліджували вплив розподілу арматури на властивості двопролітних нерозрізних балок. За результатами проведених досліджень автори [1] зробили висновок, що прогини нерозрізних залізобетонних балок з ненапруженою і попередньо напруженою арматурою при зміні розподілу опорної і прольотної арматури в межах 0,4...3 в експлуатаційних стадіях роботи змінюються несуттєво (до 15%).

Автором [2] наведені результати дослідження перерозподілу зусиль в нерозрізних залізобетонних попередньо напружених балках збірної конструкції. Автор [2] зазначає: після того, як діючі моменти досягнуть величини, приблизно рівної 75 – 80 % своїх граничних значень, графіки дослідних моментів починають прагнути до граничних значень моментів, що визначаються армуванням.

Автором [3] були проведені експериментальні дослідження збірних попередньо напружених балок. За результатами досліджень автором [3] були зроблені такі висновки: розрахунок несучої здатності збірних балок може виконуватись з урахуванням повного перерозподілу зусиль способом вирівнювання моментів у середньому прольоті і на проміжних опорах.

Автори [4] зазначають, що в збірних залізобетонних нерозрізних балках регулювання зусиль може виконуватись за допомогою натягу арматури стиків, найбільш ефективними та індустріальними є стики з прямолінійною арматурою, що напружується електротермічним методом.

Експериментальні дослідження виконуються з метою встановити особливості роботи збірно-монолітних нерозрізних двопролітних залізобетонних балок з попередньо-напруженими стиками при дії одноразового та повторних (малоциклових) навантажень; встановити характер перерозподілу зусиль в балках (опорні реакції, пролітні та опорні моменти); вивчити напружено-деформований стан нормальних перерізів у прольотах і на опорі з урахуванням повторних навантажень; встановити вплив повторних навантажень на розвиток прогинів балок та ширину розкриття тріщин, нормальних до поздовжньої осі елемента.

Дослідні балки виготовляли збірно-монолітними загальною довжиною 300 см і з розмірами поперечного перерізу 16×10 см, які склалися з двох збірних однопролітних балок, з'єднаних монолітним стиком на середній опорі. Для виготовлення балок використовували бетон, який на початку випробувань мав кубикову міцність $f_c = 36,5$ МПа, а призмову $f_{c, prism} = 27,4$ МПа. Армувались балки з урахуванням перерозподілу зусиль в прольотах і на опорах по одному робочому стержню $\varnothing 14$ мм зі сталі класу А500с. За результатами випробувань арматура мала межу текучості $\sigma_y = 539,3$ МПа, граничний опір розтягання – $\sigma_u = 675,8$ МПа, модуль пружності $E_s = 1,9261 \times 10^5$ МПа, максимальні деформації $\varepsilon_{su} = 280 \times 10^{-5}$. Рівень попереднього натягу арматури стиків – $0,85 \sigma_y$.

Опорна арматура стикувалася на ділянці з мінімальним згинальним моментом шляхом зварювання з випусками арматури з балок і піддавалася попередньому напруженню. Рівень попереднього натягу

арматури стику – $0,85\sigma_y$. Замонолічування стику відбувалося у віці бетону основних балок 28 діб.

Навантажували балки двома зосередженими силами ступенями, величина яких приблизно становила 8 ... 12 % від руйнуючого навантаження. Крайні опорні реакції визначали протарованими кільцевими динамометрами. В процесі навантажень і розвантажень балок на кожному ступені вимірювали деформації стиснутого бетону і розтягнутої арматури, ширину розкриття тріщин, прогини балок під зосередженими силами і в середині прольотів.

Перша балка випробовувалась одноразово до руйнування, а інші піддавались повторним навантаженням. Критерієм руйнування балок вважались умови, коли деформації арматури чи бетону на опорах і в прольотах досягали граничних значень. За результатами випробувань побудовані епюри залежностей деформацій бетону стиснутої зони та поздовжньої арматури від навантаження, величини прогинів та ширини розкриття тріщин, а також зміни згинаючих моментів.

Друга балка піддавалась повторним навантаженням на рівні 0,6 від руйнівного, яке визначене при випробуванні першої балки. Після 10-ох циклів навантаження-розвантаження балка доводилась до руйнування. Рівень 0,6 визначений як експлуатаційний для більшості будівель і споруд. Третя балка також випробовувалась на рівні 0,6 від руйнівного навантаження до 7-го циклу, а на 8-10-му циклах довантажувалась до рівня навантаження 0,8 від руйнівного, після чого доводилась до руйнування. Рівень 0,8 визначений як найбільше можливе короткочасне перевантаження понад експлуатаційне для будівель і споруд.

Для першої балки майже повністю реалізувався перерозподіл зусиль на останніх ступенях навантаження, оскільки значення опорного та пролітного моментів дуже близькі. Це явище спостерігається і для аналогічних елементів без попереднього напруження [5]. Величина прогинів перед руйнуванням також значно збільшується, як і для звичайних балок [6]. Перерозподіл зусиль відображається і на діаграмах деформацій стиснутої зони бетону та поздовжньої арматури, але треба зазначити, що внаслідок попереднього натягу деформації арматури змінюються дещо інакше, ніж для звичайних балок – на опори вони менші, ніж в прольоті, і зрівнюються аж перед руйнуванням. Аналогічно відбувається і процес тріщиноутворення, оскільки в над опорній зоні бетон попередньо обтиснений і тріщини з'являються набагато пізніше, ніж в прольотах, активно розвиваючись вже на останніх ступенях навантаження перед руйнуванням.

Друга балка при експлуатаційному рівні навантаження працює як пружна система з незначними залишковими величинами прогинів,

деформацій та розкриття тріщин, подібно до звичайних балок [5, 6], з урахуванням вищезазначених особливостей. При такому режимі перерозподіл зусиль майже не відбувається. Крім того, після п'ятого циклу спостерігається стабілізація всіх величин, що характеризують роботу елемента.

Для третьої балки при довантаженні до рівня 0,8 від руйнівного спостерігається стрибкоподібне збільшення величин прогинів та деформацій з одночасним підвищенням їх залишкових складових. На цьому рівні перерозподіл проявляється більш виразно, що й відображається на всіх діаграмах. Після розвантаження до експлуатаційного рівня загальна жорсткість елемента нижча, ніж перед довантаженням, як і для аналогічних балок без попереднього натягу [6].

Висновки. 1. Збірно-монолітні нерозрізні залізобетонні балки з попередньо-напруженими стиками працюють подібно до аналогічних конструкцій без попереднього напруження, але з урахуванням певних важливих відмінностей, викликаних власне попереднім натягом арматури та відповідно обтисненням бетону замонолічування на приопорній ділянці. 2. Рівень попереднього напруження в балках зумовлює величину ширини розкриття тріщин та моменту тріщиноутворення, а також величину прогинів у збірно-монолітних нерозрізних залізобетонних балках.

1. Крылов С.М., Маилян Л.Р. Влияние распределения арматуры на свойства неразрезных балок. *Бетон и железобетон*. 1982. №3. С. 36-37.

2. Паршин Л.Ф. Перераспределение усилий в сборных предварительно напряженных неразрезных балках. *Совершенствование расчета статически неопределимых железобетонных конструкций*. 1968. С. 173-195.

3. Гнидец Б.Г. Сборно-монолитные статически неопределимые железобетонные конструкции с напускаемыми стыками и регулированием усилий. Дис. д.т.н.: 05.23.01. Москва, 1989. 511с.

4. Гнидец Б.Г., Завадяк П.П. Опыт применения сборно-монолитных конструкций с напускаемой арматурой в стыках. *Бетон и железобетон*, 1982. № 1. С. 9-11.

5. Савицький В.В. Експериментальні дослідження роботи збірно-монолітних нерозрізних залізобетонних балок при дії повторних навантажень. *Будівельні конструкції*, 2003. С. 90-96.

6. Савицький В.В. Експериментальні дослідження прогинів та ширини розкриття тріщин у збірно-монолітних нерозрізних залізобетонних балках при дії повторних навантажень. *Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди*, 2003. С. 302-311.

ВПЛИВ ОСІДАННЯ ФУНДАМЕНТІВ НА ВНУТРІШНІ ЗУСИЛЛЯ КАРКАСІВ БУДІВЕЛЬ

Савицький В.В., Кочкар'єв І.Д.

(Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне)

***Abstract.** The dependence between the settlement of foundations and the internal forces of frames in two-span steel frame buildings was investigated. The moments of the forces of load-bearing structures were compared in several cases.*

***Keywords:** internal forces, settlement of foundations, moment diagram, redistribution of forces, steel frames.*

Роботу каркасів будівель та споруд з урахуванням осідання фундаментів розглядало у своїх роботах чимало відомих вчених, серед яких можна відмітити Михайловський Д.В. [1], Пічугін С.Ф. [2], Самородов О.В. [3]. Чинні норми [5] проектування передбачають розрахунок каркасів будівель і споруд з урахуванням роботи основ та фундаментів. Загально відомо, що в наслідок навіть незначного осідання фундаментів у рамних каркасів споруд відбувається зміна внутрішніх зусиль. Чинні норми проектування обмежують максимальні значення граничних осідань; вважається, якщо ці значення не будуть перевищені, зміною зусиль можна знехтувати. Зміна цих зусиль буде залежати від типу конструктивної схеми будівлі чи споруди. Існує ціла низька конструктивних схем, як правило з шарнірними вузлами, в яких осідання фундаментів не викликає зміни внутрішніх зусиль. Але такі схеми не завжди є економічно доцільними. Нами пропонується більш детально дослідити вплив осідання для рамних конструктивних схем. Розгляд цього питання дозволить сформулювати основні положення щодо врахуванню даного явища.

Мета роботи полягає у встановленні необхідності врахування осідань основ та фундаментів при розрахунку рамних конструктивних схем.

Змінну зусиль в основу несучих конструкцій будемо розглядати на прикладі одно етажної рамної конструктивної схеми залежно від

осідання фундаментів. Будівля виконана в металевому каркасі згідно з нормами [5] та має наступні геометричні параметри: крок колон 6×6 , висота колон 4м, розміри будівлі 12×12 . Будівля складається з плоских поперечних рам розташованих з кроком 6м, рами двопролітні безшарнірні, з'єднання рам з фундаментом жорстке. Просторова жорсткість каркасу забезпечується розпірками, які з'єднують рами між собою, а також жорстким диском плит покриття. Покриття виконане із кругло-пустотних залізобетонних плит [5]. Колони плоских рам виконані із колонного двотавра № 25К1. Балочні елементи рам виконані із двох двотавра зварених в короб № 30. Фундаменти прийняті стовпчастими шириною подушки $1,5 \times 1,5$ [4]. Конструктивна схема такої будівлі показана на рис. 1.



Рис. 1. Рамна конструктивна схема будівлі

Розглядувана схема чутлива до осідання фундаментів. Проведемо чисельне моделювання осідання фундаментів для даної конструктивної схеми. Моделювання осідання будемо проводити шляхом підбору коефіцієнту Пастелі найбільш навантаженого фундаменту до заданих осідань. Такий розрахунок будемо виконувати для різних рівнів граничних осідання S_y , які регламентують чинні норми проектування. Для кожного з рівнів будемо визначати значення чотирьох згинаючих моментів (рис. 2): M_{o1} – опорний момент над середньою колоною; M_{o2} – опорний момент над крайньою колоною; M_{o3} – момент в крайніх фундаментах; M_p – пролітний момент.

Результати числового експерименту приведені нижче у таблиці. Проведений числовий експеримент дозволив встановити, що осідання фундаменту найбільше впливає на значення згинаючих моментів у

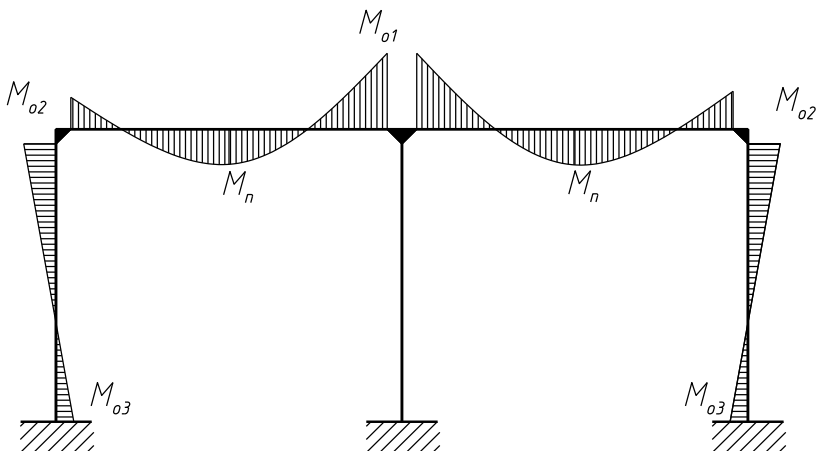


Рис. 2. Епюра моментів плоскої рами

крайніх опор на верхніх вузлах M_{o2} . В наслідок осідання фундаментів опорний момент середньої стійки M_{o1} , а пролітний зростає. Відбувається перерозподіл зусиль [5]. Знайдемо значення відносного осідання фундаментів, яке відповідає збільшенню опорних та пролітних моментів на 20%. Переважна більшість несучих конструкцій мають такий запас. Це дозволить встановити значення відносного осідання, за якого можна не враховувати осідання фундаментів. Для цього проведемо апроксимацію значень числового експерименту (рис. 3). Залежність пролітних згинаючих моментів від відносних осідань будемо описувати квадратичною залежністю, яка після апроксимації методом найменших квадратів набуде наступного вигляду

$$\frac{S}{S_y} = -4.7001 \left(\frac{M_n}{M_{n6}} \right)^2 + 10.45 \frac{M_n}{M_{n6}} - 4.8086 \quad (1)$$

Аналогічно визначмо граничне значення відносних осідань для згинаючих моментів M_{o2} . Для даних моментів залежності прийняті експонентним рівнянням, наступного вигляду:

$$\frac{S}{S_y} = 0.0178e^{1.7828 \times \frac{M_{o2}}{M_{o26}}} \quad (2)$$

Коефіцієнт варіації для отриманих рівнянь складає $v = 0.998$, що підтверджує достовірність прийнятих функцій.

Таблиця – Залежності між внутрішніми зусиллями в конструкції та осіданням фундаментів

№	Значення відносного осідання фундаментів, $\frac{S}{S_y}$	Значення відносних згинаючих моментів		
		$\frac{M_{o1}}{M_{o16}}$	$\frac{M_{o2}}{M_{o26}}$	$\frac{M_{п}}{M_{п6}}$
1	1.0	0.006	2.25	1.11
2	0.75	0.112	2.11	1.34
3	0.5	0.283	1.87	1.44
4	0.25	0.566	1.48	1.51

За допомогою даних графіків визначимо безпечний рівень осідання будівлі, що задовольнить чинні норми проектування.

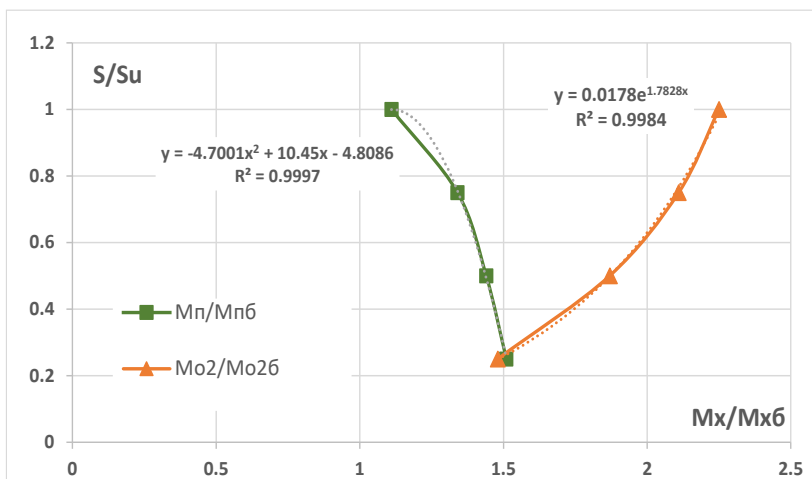


Рис. 3. Зміна зусиль в конструктивних елементах сталеворамної будівлі

Допустимим відносним осіданням фундаментів будівлі, $\frac{S}{S_y}$ для прольотів $M_{п}$ є $\frac{S}{S_y} = 0.96$, а для згинаючих моментів на крайніх опорах M_{o2} є $\frac{S}{S_y} = 0.15$.

Висновок. Результати дослідження показали, що врахування осідань фундаментів є необхідним показником для розрахунку сталеворамних споруд та будівель. За допомогою методики апроксимації залежностей між відносним осіданням та згинаючими моментами дозволило встановити безпечні значення осідання в межах чинних норм проектування $h = 2.25\text{см}$, що значно полегшить розрахунок будівлі. За допомогою наведених графіків та виведених рівнянь у роботі, можна знайти усі варіанти залежності між внутрішніми зусиллями та осіданням фундаментів. Отже, отримані результати можуть бути використані для покращення методів проектування та підвищення надійності рамних конструкцій будівель.

1. Михайловський Д., Склярова Т. Вплив нерівномірних осідань декількох фундаментів арок на напружено–деформований стан всієї будівлі. *Будівельні конструкції. Теорія і практика*. 2022. Вип. 10. С. 56-65. URL: <https://doi.org/10.32347/2522-4182.10.2022.56-65>

2. Пічугін С.Ф. Особливості зміни зусиль в елементах сталевого каркасу промислової будівлі за 80 років експлуатації / С. Ф. Пічугін, О. В. Семко, М. В. Бібік, Г. М. Трусов, В. М. Бібік, А. В. Гасенко. *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. 2016. Вип. 61. С. 339-346. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vodaba_2016_61_54.

3. Samorodov Oleksandr Аналіз конструктивних рішень умовно стрічкових (протяжних) фундаментів / Oleksandr Samorodov, Iryna Khrapatva, Oleg Krotov, Sergii Tabachnikov // *ACADEMIC JOURNAL Industrial Machine Building, Civil Engineering*. Полтава: ПНТУ, 2018. Т. 2 (51). С. 108-114. doi: <https://doi.org/10.26906/znp.2018.51.1300>.

4. ДБН В.2.1-10:2018. Основи та фундаменти споруд. Основні положення проектування // Мінрегіонбуд України. Київ, 2018. 36с.

5. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. Зі Зміною № 1. [Чинні з 2015–01–01]. К.: Мінрегіон України, 2014. 199с.

**ВПЛИВ МЕХАНОАКТИВАЦІЇ ЗМІШАНОГО ЦЕМЕНТУ
НА ЕКЗОТЕРМІЧНИЙ РОЗІГРІВ І МІЦНІСТЬ
ЦЕМЕНТНОГО КАМЕНЮ**

Стрельцов К.О., Горбовий О.Л., Барабаш І.В.

(Одеська державна академія будівництва та архітектури, м. Одеса)

***Abstract.** The results of the experiments considered in the article are related to the determination of the effect of mechanical activation of Portland cement with the addition of ground limestone on the thermomechanical characteristics of hardening and hardened cement stone. Such cements are obtained both by grinding cement with the addition of limestone and by thoroughly mixing Portland cement with ground limestone (mixed cements).*

***Keywords:** mechanoactivation, superplasticizer, ground limestone, exothermy, water-hardening ratio.*

Розглянуті у статті результати дослідів пов'язані з визначенням впливу механоактивації портландцементу з добавкою меленого вапняку на термо-механічні характеристики тверднучого і затверділого цементного каменю. Такі цементи одержують як сумісним помелом цементу з добавкою вапняку так і за рахунок ретельного змішування портландцементу з меленим вапняком (змішані цементі). Відомо [1], що в умовах використання традиційної технології виготовлення бетонних і залізобетонних виробів введення до складу в'язучого інертних мінеральних добавок приводе до зниження міцності бетону, що потребує, зокрема, використання цементів більш високих марок. Підвищення міцності бетону можливо також за рахунок використання суперпластифікуючих добавок[2]. Перспективним методом покращення міцнісних характеристик затверділих композитів на основі таких змішаних цементів є їх механо-хімічна активація в швидкісних турбулентних змішувачах [3]. Сумісний вплив на змішані цементі механо-хімічної активації в присутності суперпластифікуючих добавок, на наш погляд, викличе підвищення міцності цементного каменю при одночасному зниженні собівартості кінцевого продукту.

В експериментальних дослідженнях в якості в'язучого використовувався портландцемент ПЦ П/А-Ш-500, який відповідає вимогам ДСТУ Б В.2.7-46:2010 "Цементи загальнобудівного призначення. Технічні умови". В якості мінеральної добавки до цементу використовувався мелений вапняк ($S=350 \text{ м}^2/\text{кг}$) в кількості 20 і 40 % від маси в'язучого. Для підвищення рухливості суміші використовувався суперпластифікатор Релаксол - Супер ПК (СП) в кількості 0,5 і 1,0 % від маси в'язучого.

В табл. 1 наведені експериментальні дані, які відображають вплив рецептурного-технологічних факторів, а саме: вмісту меленого вапняку у в'язучому - ($20 \pm 20 \%$), витрати СП - ($0,5 \pm 0,5 \%$) та механохімічної активації на водо-тверде відношення (В/Т) цементно-вміщуючих композицій з розпливом конусу суміші на приборі Сутторда в діапазоні $d=120 \pm 5 \text{ мм}$.

Таблиця 1 – Вплив рецептурно-технологічних факторів на водо-твердне відношення цементно-вміщуючих композицій

№ складу	Портландцемент, %	Мелений вапняк, %	Релаксол - Супер ПК, %	В/Т	№ складу	Портландцемент, %	Мелений вапняк, %	Релаксол - Супер ПК, %	В/Т
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
КОНТРОЛЬ					МЕХАНОАКТИВАЦІЯ – 180 сек				
1	100	0	0	0,42	10	100	0	0	0,38
2	100	0	0,5	0,36	11	100	0	0,5	0,32
3	100	0	1,0	0,34	12	100	0	1,0	0,31
4	80	20	0	0,44	13	80	20	0	0,41
5	80	20	0,5	0,39	14	80	20	0,5	0,35
6	80	20	1,0	0,35	15	80	20	1,0	0,33
7	60	40	0	0,45	16	60	40	0	0,42
8	60	40	0,5	0,39	17	60	40	0,5	0,36
9	60	40	1,0	0,36	18	60	40	1,0	0,33

Аналіз експериментальних даних, наведених у табл. 1, свідчить про те, що введення в портландцемент меленого вапняку приведе до зменшення рухливості суміші, що потребує зростання її водотвердого відношення. Так, забезпечення необхідної рухливості суміші після механохімічної активації протягом 180 сек (з використанням тільки портландцементу та при відсутності СП) досягається при водо-цементному (в подальшому водотвердому) відношенні 0,38. Заміна 20 % портландцементу на мелений вапняк приведе до зростання В/Т від 0,38 до 0,41, тобто майже на 8 %. Зростання вмісту меленого вапняку в в'язучому до 40 % викликає підвищення водотвердого відношення до 0,42, тобто майже на 11 % в порівнянні з в'язучим без добавки меленого вапняку. Аналогічний вплив вмісту карбонатної добавки на водотверде відношення спостерігається також і для активованих цементно-вміщуючих композицій з добавкою суперпластифікатору. Підвищення водовмісту із зростанням кількості меленого вапняку спостерігається також і для немеханоактивованих цементно-вміщуючих композицій. В цьому разі зростання вмісту меленого вапняку викликає зростання водотвердого відношення від 0,42 (карбонатна добавка відсутня) до 0,45 (кількість меленого вапняку 40 %). Що стосується впливу механохімічної активації на рухливість суміші, то слід відмітити, що швидкісне змішування цементно-вміщуючих композицій протягом 180 сек дозволяє отримувати необхідний її розплив на приборі Сутторда при знижених значеннях водотвердого відношення. Так, швидкісне змішування цементно-вміщуючої композиції (№ складу –10, табл.1) забезпечує одержання заданого розпливу суміші при В/Т = 0,38. Аналогічний розплив суміші заданого складу, але яка механоактивації не підлягала (№ складу – 1, табл. 1), забезпечується при підвищеній (на 10,5 %) витраті води замішування. Із досліджених факторів впливу (вміст меленого вапняку, витрата суперпластифікатору) найбільший вплив на водовміст активованої цементно-вміщуючої композиції надає витрата суперпластифікатору Релаксол - Супер ПК. Зростання його кількості у механоактивованому в'язучому від 0 до 1 % викликає зменшення водовмісту в середньому на 23...27 %. Підтвердженням впливу суперпластифікатору на кінетику протікання процесів гідратації як на механоактивованому в'язучому, так і на в'язучому, яке не підлягало механоактивації є дані по екзотермічному розігріву цементно-водних композицій як без добавки меленого вапняку (рис. 1а), так і з добавкою 20% меленого вапняку (рис. 1б).

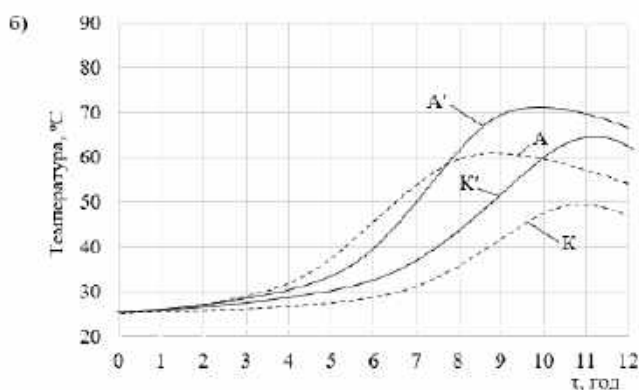
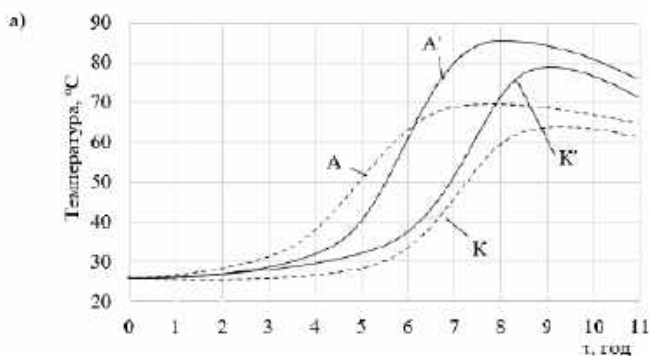


Рис.1 Вплив механохімічної активації на екзотермічний розігрів цементно-вміщуючої водної композиції:

- а) – цементно-водна композиція без добавки меленого вапняку;
- б) – цементно-водна композиція з добавкою 20 % меленого вапняку;
- К – контроль (механоактивація відсутня, Релаксол-Супер ПК = 0 %);
- А – механоактивована цементно-вміщуюча композиція, Релаксол-Супер ПК = 0 %);
- К' – контроль (механоактивація відсутня, Релаксол-Супер ПК = 1 %);
- А' – механоактивована цементно-вміщуюча композиція, Релаксол-Супер ПК = 1 %);

Наведені графічні залежності свідчать про те, що введення до складу цементно-вмішуючої композиції суперпластифікатору зменшує її водовміст та підвищує максимальну температуру розігріву з 59 °С (Релаксол - Супер ПК відсутній) до 76 °С (концентрація суперпластифікатору складає 1,0 %).

Заключним етапом дослідження було виявлення впливу механохімічної активації в'язучого, витрати меленого вапняку в ньому та концентрації суперпластифікатору на міцність при стиску зразків-балочок із цементного каменю, табл.2. Склади цементно-вмішуючих композицій та технології їх виготовлення приймалися згідно таких, які наведені у табл. 1. Розгляд експериментальних даних свідчить про те, що механоактивація є потужним технологічним впливом на міцнісні характеристики цементного каменю.

Таблиця 2 – Вплив рецептурно-технологічних факторів на міцність цементного каменю при стиску, МПа

№	Активація суміші, сек	Склад суміші в'язучого		
		Портландцемент – 100 %	Портландцемент – 80 %, мелений вапняк – 20 %	Портландцемент – 60 %, мелений вапняк – 40 %
Вміст суперпластифікатору – 0 %				
1	0	25,5	14,9	11,4
2	90	32,6	17,7	12,8
3	180	34,6	19,4	14,2
Вміст суперпластифікатору – 0,5 %				
4	0	28,7	16,3	12,7
5	90	38,7	22,1	15,8
6	180	40,1	23,9	18,3
Вміст суперпластифікатору – 1 %				
7	0	32,1	18,5	13,1
8	90	40,1	22,9	16,7
9	180	43,0	25,3	18,9

Позитивний вплив механоактивації спостерігається для всіх досліджуваних складів цементно-вміщуючих водних композицій. Особливо відчутна роль механоактивації для складів з суперпластифікуючою добавкою. Так, введення до складу цементно-вміщуючої композиції 1 % Релаксол - Супер ПК сприяє зростанню міцності цементного каменю в 3-х денному віці з 32,1 МПа (механоактивація відсутня) до 43,0 МПа (механоактивація протягом 180 сек), тобто майже на 35 %. В порівнянні з контролем (механоактивація відсутня; СП=0%) сумісний вплив механоактивації і суперпластифікуючої добавки забезпечує зростання міцності цементного каменю з 25,5 МПа (контроль) до 43,0 МПа, тобто майже на 70 %. Такий технологічний прийом дозволяє вводити до складу портландцементу 20 % меленого вапняку, забезпечуючи при цьому таку ж міцність при стиску цементного каменю в 3-х денному віці як і в разі використання немеханоактивованого портландцементу але без добавки меленого вапняку. Слід відмітити, що аналогічний позитивний вплив механохімічної активації спостерігається також і для цементного каменю на змішаному в'язучому з добавкою до портландцементу 40 % меленого вапняку.

Висновки:

1. Механохімічна активація модифікованих водних цементно-вміщуючих композицій з добавкою меленого вапняку викликає зростання як інтенсивності екзотермії так і підвищення величини її максимально розігріву.

2. Використання суперпластифікатору - Релоксол Супер ПК в поєднанні з механохімічною активацією забезпечує зниження водовмісту цементно-вапнякової композиції в середньому на 23...27 %, що позитивно віддзеркалюється на підвищенні міцності цементного каменю.

1. Троян В.В. Добавки для бетонів і будівельних розчинів. Київ: Аспект – Поліграф, 2010. 228 с.

2. Фаликман В.Р. Поликарбоксилаты: вчера, сегодня, завтра / Труды 1X Международной научно-практической конференции. Запорожье: Будиндустрия ЛТД, 2008. С.72-76.

3. Barabasch I.V., Babiy I.M., Streltsov K.O. Intensive separate technology and its influence on the properties of cement -Water compositions, solutions and concretes on their basis // Modern construction and architecture, Issue N2. Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2022. P. 44-51.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВОГНЕЗАХИСТУ ТЕКСТИЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ ГІДРОФОБНИМ ПОКРИТТЯМ

Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Ющенко А.В.
(Київський національний університет будівництва і архітектури,
м. Київ)

***Abstract.** The analysis of fire-retardant materials for fabrics is carried out and it is established that the paucity of data for explanation and description of the process of fire protection, neglect of elastic coatings, leads to ignition of fabric structures under the action of flame. The development of reliable methods for studying the conditions of fire protection of fabrics leads to the creation of new types of fire protective materials. Therefore, it becomes necessary to determine the conditions for the formation of a barrier both for high temperatures and for leaching in the presence of precipitation and to establish a mechanism for inhibition of these processes.*

***Key words:** protective equipment, fabric, body penetration, weight loss, fabric surface treatment, fire-retardant coatings.*

Оскільки при експлуатації легкозведених конструкцій, виготовлених з використанням природних волокон (льону, бавовни та сумішей), які високочутливі до впливу високої температури і вогню, можливе їх займання. В зв'язку з цим визначається необхідність розроблення заходів захисту з використання ефективних вогнезахисних матеріалів, оскільки використання сольових антипіренів для деревини малоефективне, так як конструкція не жорстка й можливе їх осипання в процесі експлуатації. Окрім того, атмосферні опади теж впливають на процес деградації покриття. Тому необхідно створити вогнезахисні матеріали для таких конструкцій за рахунок направленого формування покриття, стійкого до дії перемінних температурно-вологісних факторів.

В роботі [1] розглядається використання водно-спиртового розчину тетроексидсилану, водного розчину силікату натрію, фосфору тримуючих антипіренів для надання вогнезахисних властивостей целюлозним текстильним матеріалам. Досліджуються швидкість тепловиділення, час та пікова швидкість тепловиділення, які

є найважливішими факторами при прогнозуванні швидкості зростання пожежі. Однак, не вказано як витримують дані композиції зміну температурно-вологісних полів.

В роботі [2] представлений синтезований ряд борово-азотних полімерів, щоб забезпечити екологічно чисту альтернативу вогнестійкої обробки бавовняних тканин. Органічне поєднання бору, фенілборазотної кислоти, було успішно пов'язано з розгалуженим поліетиленіміном, що підтверджено аналізом. Термогравіметричний аналіз показав, що полімер демонструє оптимальну термоокислювальну стабільність, легко наноситься на бавовняні тканини простим методом занурення з високим поглинанням в середовищі ацетону. Аналіз морфології обуглювання оброблених тканин виявив вогнестійкість покриття за рахунок спучення вогнезахисного механізму.

В роботі [3] відзначено смоли на основі меламіну, які широко використовуються в тканинах для додання вогне- і теплостійкості. Модельовані експерименти з пранням припускають, що за один раунд прання водою 76...90% меламіну було видалено з одягу. А тому постає задача зафіксувати антипірен у матеріалі.

Метою роботи є визначення вогнезахисної ефективності зразків елементів намету при обробленні зворотної поверхні гідрофобним покриттям.

При проведенні досліджень використовували модельні зразки елементів намету, виготовлені з парусинової тканини, які було оброблено вогнезахисними засобами з середини та гідрофобізатором ззовні:

- оброблений гідрофобізатором (5%-им розчином ГДЖ-94);
- оброблений гідрофобізатором (5%-им розчином парафіну).

При проведенні випробувань в якості розчинника було використано уайт-спіріт, як паливо – рідку запалювальну суміш (бензин).

На рис. 1 показано результати випробувань вогнезахисного зразка елементів намету, виготовлених з парусинової тканини та обробленого гідрофобізатором.



Рис. 1. Результати випробувань необробленого модельного зразка елементів намету, виготовленого з парусинової тканини:

- а – запалювання модельного вогнища; б – результати горіння необробленого зразка; в – результати горіння обробленого зразка

В результаті випробувань на гідрофобність (рис. 1) встановлено відсутність протікання води в обох зразках протягом 600 с.

При випробуваннях на вогнезахисну ефективність встановлено, що для вогнезахищеного зразка, обробленого гідрофобізатором (5%-ий розчин ГДЖ-94) було зафіксовано зниження ефективності та обвуглювання матеріалу, а для вогнезахищеного зразка обробленого гідрофобізатором (5%-ий розчин парафіну) було зафіксовано зниження ефективності за рахунок горіння парафіну та локальну вигорання матеріалу.

В результаті проведених випробувань встановлено:

– при дії полум'я на необроблені модельні зразки елементів намету, виготовлених з парусинової тканини, відбувається займання та поширення полум'я поверхнею, що призводить до його повного згорання протягом 105...120 с;

– при випробуваннях на вогнезахисну ефективність для вогнезахищеного зразка, обробленого гідрофобізатором (5 %-ий розчин ГДЖ-94), було зафіксовано зниження ефективності та обвуглювання матеріалу, яке склало 100%, а для вогнезахищеного зразка, обробленого гідрофобізатором (5%-ий розчин парафіну), було зафіксовано зниження ефективності за рахунок горіння парафіну та локальне вигорання матеріалу, а обвуглювання становило 100%.

Висновки. Таким чином, проведено натурні випробування елемента намету та встановлено повне згорання необробленого зразка, натомість для вогнезахищеного зразка встановлено відсутність загорання та поширення полум'я за рахунок утворення на поверхні тканини теплозахисного шару коксу. Оброблення поверхні гідрофобізатором не дозволяє проникненню води, але знижує вогнезахисну ефективність.

1. Цапко Ю.В., Цапко О.Ю., Бондаренко О.П., Ломача В.В. Оптимізація неорганічних складових вогнезахисного лаку для деревини. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2021. Вип. 82. с. 123-132. doi: 10.31650/2415-377X-2021-82-123-132.

2. Takey Y., Taussarova B.R., Burkytbay A. Investigation of heat processed cellulose textile materials of sol-gel composition. Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii. Seriya Teknologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2020. Vol. 6. pp. 236-240.

3. Chan S.Y., Si L., Lee K.I., Ng P.F., Chen L., Yu B., Hu Y., Yuen R.K., Xin J.H., Fe B. A novel boron-nitrogen intumescent flame retardant coating. Cellulose. 2018. Vol. 25. pp. 843-857. doi: 10.1007/s10570-017-1577-2.

4. Zhu H., Kannan K. Determination of melamine and its derivatives in textiles and infant clothing purchased in the United States. Science of the Total Environment. 2020. Vol. 710. 136396.

ОСОБЛИВОСТІ ЕНЕРГІЇ АКТИВАЦІЇ ТЕРМІЧНОМОДИФІКОВАНОЇ ДЕРЕВИНИ

Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Ющенко А.В.
(Київський національний університет будівництва і архітектури,
м. Київ)

***Abstract.** Wood, as a building material, is widely used in construction and architecture due to its mechanical and operational properties, but under the influence of atmospheric factors it is destroyed. The results of thermogravimetric researches are given, the dependence of weight loss on temperature of researches on the basis of which activation energy is calculated is defined. The results of determining the activation energy show that for hardwood species this value exceeds more than 1.5 times compared to softwood.*

***Key words:** wood, modification efficiency, thermodestruction, activation energy, decomposition, wood stability.*

Деревина, як будівельний матеріал, широко застосовується в будівництві й архітектурі завдяки своїм механічним та експлуатаційним властивостям, але під впливом атмосферних чинників руйнується. Саме ці матеріали чутливі до впливу вологи і біологічного пошкодження. Підвищити рівень експлуатації об'єктів, де використовуються будівельні конструкції з деревини, можливо за допомогою її модифікування, суть якого полягає в наданні деревині здатності протистояти дії вологи, поширенню біопшкодження, яке сприяють деструкції деревини і прискоренню процесу руйнування.

Знання фізико-хімічних властивостей таких речовин, показників їх якості, механізму дії на матеріали, дає змогу здійснювати їх вибір з урахуванням економічних показників, тривалості і безпеки застосування, екологічних аспектів тощо [1, 2]. А застосування захисту дозволяє зберігати свої функції при експлуатації протягом заданого періоду часу [3, 4].

Тому розроблення технологічних режимів з модифікування деревини, дослідження теплофізики, впливи особливостей структури, на цей процес є невирішеною складовою забезпечення стійкості будівельних конструкцій з деревини та визначають необхідність встановлення механізму термічного модифікування для таких матеріалів.

Метою роботи є дослідження енергії активації розкладу термічно-модифікованої деревини і встановлення її ефективності.

Для встановлення механізму термічного модифікування деревини використовували зразки тирси порід деревини як граб, ясен, сосна. Маса зразка становила 190 мг.

Термогравіметричне дослідження процесів термічної деструкції в динамічному режимі із застосуванням дериватографа Q-1500 D, швидкість нагрівання – 2,5 градусів на хвилину, зразок порівняння – порошок α -корунду, матеріал тиглів – алунд, чутливість гальванометрів: DTA – 250 мкВ, DTG – 500 мкВ.

Безпосередні дані щодо процесів, що відбуваються у зразках матеріалів під час їх нагрівання в динамічному режимі, одержано в результаті термогравіметричних досліджень. Результати аналізу досліджуваних матеріалів ілюструються на рис. 1.

На рис. 1 приведено графічна залежність швидкості деструкції деревини від оберненої температури. Значення енергії активації (E) розраховується за залежністю:

$$E = tg\varphi \cdot R \quad (1)$$

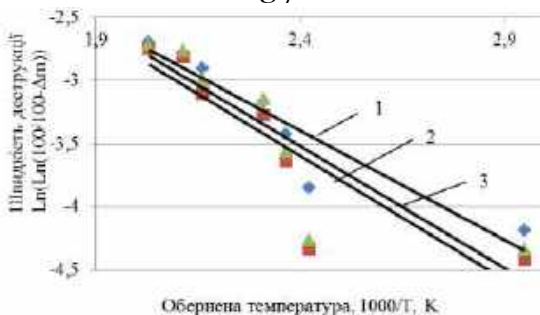


Рис. 1. Графічна залежність швидкості термодеструкції деревини від оберненої температури: 1 – сосна; 2 – граб; 3 – ясен

Температура, за якої починається інтенсивна деструкція деревини, тобто спостерігається швидка втрата маси зразків, становить 215-250°C. Зокрема, у зразку деревини поряд з ендотермічними процесами піролізу (відщеплення летких продуктів) навіть за порівняно невисоких температур відбуваються екзотермічні окиснювальні процеси. Основне збільшення втрати маси в діапазоні температур 180-220°C відбулося за рахунок екстрактивних речовин води і етанолу в результаті деградації полісахариду. При термічній обробці відбувається утворення рідкої і газоподібної фази в додаток до масивної деревини. Рідка фаза при температурах 200-250°C майже виключно вода і оцтова кислота з

невеликими кількостями мурашиної кислоти, фурфуролу і метанолу [5]. Кислоти каталізують розкладання полісахаридів і знижують їх вміст.

Таким чином, отримані термогравіметричні показники дають можливість визначити швидкість термічного розкладу матеріалу при заданій температурі і відповідно показати якісну оцінку теплових ефектів, але більш важливою задачею є визначення енергії активації термоокислювальної деструкції.

В табл. 1 наведено значення енергії активації при термічному розкладі деревини.

Таблиця 1 - Розраховане значення енергії активації при термічному розкладі деревини

№ п/п	Деревина	Енергія активації, E (кДж/моль)
1	сосна	13,47
2	граб	23,28
3	ясен	19,95

Як, видно з табл. 1, піроліз деревини твердих листяних порід потребує більшої енергії активації, а значить потребує затрат при її термічному модифікуванні, а саме часу та температури.

Висновки. Таким чином, з розрахунку виявлено, що для термічного розкладу деревини сосни потребується значно менша енергія активації ніж для розкладу деревини граба та ясеня. Результати досліджень дозволять також ціленаправлено вирішувати подальші задачі щодо створення нових засобів і способів отримання органічних матеріалів та умов експлуатації на різних об'єктах.

1. Wang Y., Zhao J., Chen J. Effect of polydimethylsiloxane viscosity on silica fume-based geopolymer hybrid coating for flame-retarding plywood. *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 239. 117814. 7 p.

2. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Determination of the laws of thermal resistance of wood in application of fire-retardant fabric coatings. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 2. No 10 (104). pp. 13-18.

3. Tsapko Yu., Tsapko A., Bondarenko O. Modeling of thermal conductivity of reed products. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD)*. 2020. Vol. 907. 012057. 7 p. doi:10.1088/1757-899X/907/1/012057.

4. Esteves B., Pereira H. Wood modification by heat treatment: A review. *Bioresources*. 2009. Vol. 4 (1). pp. 370-404.

5. Nuopponen M., Vuorinen T., Jamsä S., Viitaniemi P. Thermal modifications in softwood studied by FT-IR and UV resonance Raman spectroscopies. *Journal Wood Chem. Technol*. 2004. Vol. 24. pp. 13-26.

**IMPLEMENTATION OF NEW STRUCTURAL
AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS INTO EXISTING
CONSTRUCTION PRODUCTION**

Meneiliuk O.I., Russyi V.V., Bochevar K.I.

(Odesa State Academy of Civil Engineering and Architecture, Odesa)

***Abstract.** The report is dedicated to presenting the results of implementing patented structural and technological solutions for erecting enclosure structures using permanent formwork in active construction production.*

***Keywords:** structural and technological solutions, permanent formwork*

The development and implementation of new technologies in construction allows for increased efficiency. More modern building materials and structural-technological solutions are gradually replacing traditional ones in the context of ongoing production. One such material, which has great interest and demand among consumers and clients, is polystyrene foam concrete. This is a lighter version of traditional classical concrete, where heavy fillers are replaced with a lightweight polymer (foamed polystyrene beads). As a result, not only is it possible to achieve significantly lower weight for enclosure structures, but also excellent thermal insulation properties.

Polystyrene foam concrete is a lightweight concrete made with a mineral binder and a filler of foamed polystyrene. Its weight is several times less than that of traditional concrete. This significantly reduces the load on load-bearing structures. Moreover, it has good sound insulation properties. In addition, polystyrene foam concrete is an effective and inexpensive type of insulation. The authors' research has shown that it can be successfully used for enclosure structures. This led to the patenting of two new solutions. They were tested in the conditions of active construction production. Both solutions were examined by specialists from the state-owned enterprise «State research institute of building constructions» (Kyiv). They confirmed the thermal performance of these solutions, high sound insulation properties, and guaranteed a service life of at least 30 years.

The first solution is the patent UA 149402 «Wall of the building» [1] (fig. 1). The basis of this solution is the installation of a steel frame made of light steel thin-walled construction (LSTC) (1), with the space between them filled with polystyrene foam concrete (2). The permanent formwork is made from cement-bonded particle boards (CBPB) (3).

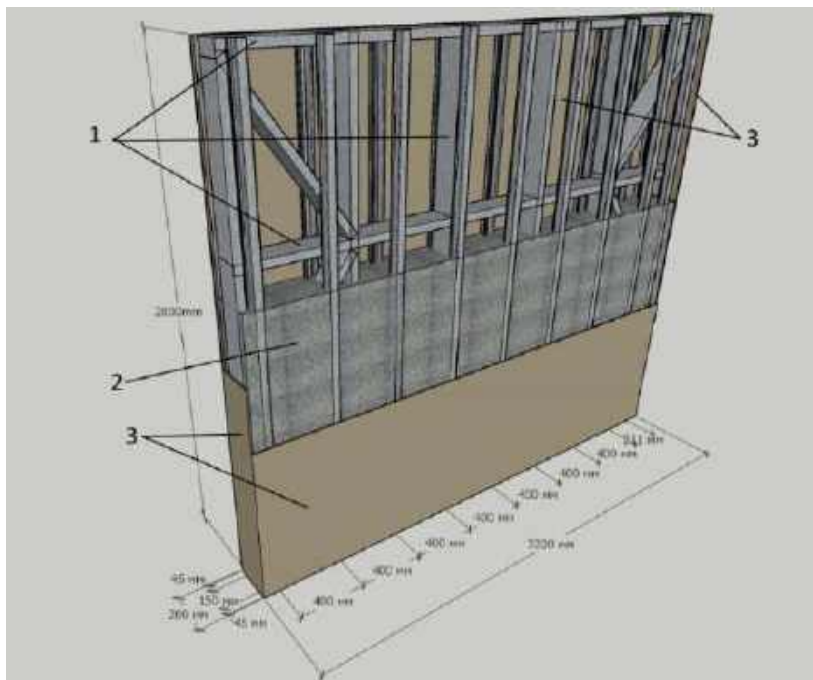


Fig. 1. General view of the patented structural and technological solution UA 149402 «Wall of the building»: 1 - LSTC profiles; 2 - layer of polystyrene foam concrete; 3 - elements of permanent formwork (CBPB)

The method of installing the patented structure involves the following technological operations.

The construction of the wall begins with the assembly of the frame from LSTC (1). The assembly of the frame (1) is carried out using self-tapping screws. The individual components of the structure are manufactured at a plant with the required profile and size, and then delivered to the construction site. Special software has been developed for this purpose. The frame structures are assembled at the construction site and delivered to their project position in a pre-assembled form.

The frame (1) can be assembled even without crane equipment. The frame is mounted according to the technical diagrams of the structures.

Next, the permanent formwork from CBPB (3) is installed by fastening it with self-tapping screws from the external and internal sides to the frame (1) using special patented elements – «omega profiles». These significantly reduce the area of «thermal bridges» and ensure high thermal resistance of the protected structures.

After the permanent formwork is mounted, the space formed between the frame (1) elements and the permanent formwork (3) is filled with polystyrene foam concrete mixture (2). Due to the specially selected composition (including necessary additives) and the plasticity of the polystyrene foam concrete mixture (2), it is possible to pour the wall structure to its full height.

No compaction of the concrete mixture is required (the mixture is self-compacting). The frame made of metal profiles (1) provides spatial rigidity to the enclosure structures.

Various types and methods of finishing can be applied to such wall structures, from thin-layer plaster to cladding facades.

The second, improved, and patented solution – UA 154847 «Frame permanent formwork system» [2] (fig. 2) – differs from the first in that,

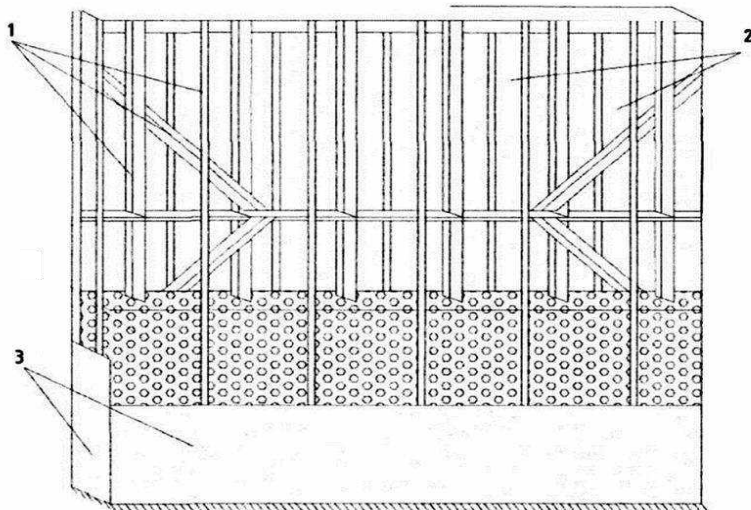


Fig. 2 – General view of the patented structural and technological solution UA 154847 «Frame Permanent Formwork System»: 1 - thermal profile; 2 - formwork made of thermal insulation boards; 3 - moisture-resistant gypsum board

instead of CBPB panels on the external side, thermal insulation boards made of polystyrene (2) are used, and on the internal side, two layers of moisture-resistant gypsum board (3) are applied.

In both patents, all elements of the enclosure structures perform several functions. LSTC are used to create a rigid frame that holds the permanent formwork and bears part of the load. Meanwhile, the CBPB panels, moisture-resistant gypsum board, or polystyrene boards serve as permanent formwork and the "rough" (preliminary) finishing layer. The monolithic polystyrene foam concrete is used as the main element of the enclosure structures. It also serves as insulation and soundproofing.

Further improvement of the considered solutions could involve using frames made of aluminum or modern polymer materials, such as fiberglass. Additionally, other materials could be considered for use as permanent formwork (e.g., moisture-resistant plywood, OSB-boards, rigid polymer panels).

In the photo (fig. 3), you can see an example of the application of the developed technology of frame permanent formwork during the construction of townhouses on the seaside.



Fig. 3 – Example of the use of the patented technology of frame permanent formwork UA 154847 «Frame permanent formwork system» during the construction of townhouses on the Black Sea coast in Odesa. The external cladding of the frame is made of polystyrene, and the internal cladding consists of two layers of moisture-resistant gypsum board: a) – the process of constructing enclosure structures for the townhouses; b) – general view of the completed townhouses

Both of the considered solutions have been widely implemented in the construction of new buildings in the Odesa region and in the city of Odesa, specifically in the following projects:

1. Construction of townhouses in the «Club Marine» residential complex in Odesa.
2. Addition of a floor to the «Club Marine» residential complex.
3. Addition of a third floor to a building in operation on Shevchenko Avenue in Odesa.
4. Construction of a restaurant in Vilково.
5. Construction of the «Sukhy Liman» cottage settlement.
6. Construction of the «Avignon» residential complex in Odesa.
7. Construction of townhouses on the Black Sea coast in Odesa.

1. Wall of the building: patent 149402 Ukraine: E04C 2/00; E04C 2/292. No. u 2021 00397; filed 02.02.2021; published 17.11.2021, Bulletin No. 46. 6 pages.

2. Frame permanent formwork system: patent 154847 Ukraine: E04C 2/00; E04C 2/292. No. u202203576; filed 26.09.2022; published 27.12.2023, Bulletin No. 52. 5 pages.

ЗМІСТ

Секція 1. МОДЕЛІ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА РІЗНОГО РІВНЯ

Вировой В. М., Семенова С.В., Коробко О.А., Суханов В.Г. Адаптація-здатність існуючого існувати	4
Гузій С.Г., Присяжна О.В., Гузій О.І. Еколого-феноменологічні та математичні підходи по кондиціюванню упарених радіоактивних відходів	7
Довгань О.Д., Вировой В.М., Довгань П.М. Структуруюча роль фібри в організації мікроструктури декоративних композитів	11
Колесников А.В., Вировий В.М., Семенова С.В. Динамічна модель структуроутворення композиційних матеріалів	15
Мартинов В.І., Тайчан Д.С., Макарова С.С., Гавришук Г.В. Прихована інформація фрактальних структур будівельних матеріалів	20
Сур'янінов М.Г., Крутій Ю.С., Кіріченко Д.О., Клименко О.М. До розрахунку кільцевих пластин на змінній пружній основі	23
Сур'янінов М.Г., Нсутов С.П., Метлицький В.В., Чучмай С.М. Математичні моделі фібробетону	26
Шинкевич О.С., Антонюк Н.Р., Луцкін Є.С., Рапоч К.В. Керуючі фактори просторово-часових процесів в алюмо-силікатвмісних системах	31
Трофимова Л.Е. Topological modeling and optimization of technology of composite materials	35

Секція 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ МАТЕРІАЛІВ І КОНСТРУКЦІЙ

Дворкін Л.Й., Бордюженко О.М. Оптимізація властивостей бетону за допомогою методів математичного моделювання	39
---	----

Дзюбенко А.Ю., Ковальський В.П. Обґрунтування доцільності використання піноізолу	46
Житковський В.В., Дворкін Л.Й., Кочкар'єв Д.В. Прогнозування міцнісних та деформативних властивостей самоущільнюваних бетонів з використанням математичних моделей	51
Кривяков С.О., Фіногенов О.І., Ігнатенко А.В. Вплив кількості поліпропіленової фібри і лігносульфонатного пластифікатору на В/Ц бетонної суміші і ранню міцність бетону	55
Семенова С.В., Колесников А.В., Левицький Д.В. Комбінаторні методи оптимізації реставраційних складів	59
Чучмай О.М. Діагностика корозійних пошкоджень та прогнозування довговічності металевих конструкцій	64
Gara O.A., Gara An.O., Kolesnikov A.V. Modeling and optimization of carbonization hardening of lightweight concrete	67
Kersh V.Ya., Khlytsov N.V., Tihoniuk S.A. Modeling the water resistance of gypsum-containing compositions	73
Makhavat Dzhusupova, Aidai Talantbek Kyzy Rice husk ash - filler in cement for fine-grained concrete	77
Pysarenko A.N. Wavelet modeling of high-frequency wave propagation in anisotropic composites	83
Секція 3. ЕЛЕМЕНТИ КОМП'ЮТЕРНОГО МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА	
Lyashenko T.V. VITALY A. VOZNESENSKY, the creator of methodologies	87
Lyashenko T.V., Moskalova K.M., Antoniuk N.R. About computational experiments to analyse the correlation of building composites properties	92

Секція 4. АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО: ТЕХНОЛОГІЯ ТА МАТЕРІАЛИ

Бачинський В.В., Шкурпіт О.М. Методика підбору філамента для 3D друку виробів, які експлуатуються у складних умовах	98
Чучмай С.М. Переваги та недоліки панельного будівництва	102
Maslyanenko Y.V. Earth-based materials for additive manufacturing in construction: a selective review of mix design	105
Секція 5. НОВІ БУДІВЕЛЬНІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ	
Бердник О.Ю., Виговський С.В. Використання відходів скла у виробництві бетону	111
Гара Ан. А., Кравченко К.Р. Стійкість епоксидних композицій в адсорбційно-активних середовищах	114
Дерев'янок В.М., Гришко Г.М., Смолін Д.О., Ватажишин О.В. Дослідження стабільності еtringітової фази наномодифікуванням цементних систем в умовах дії різних факторів	118
Дехта Т.М., Бондаренко С.В., Василенко С.В. Композиційні бетони з використанням відходів	122
Кочкар'юв І.Д., Савицький В.В. Визначення міцнісних характеристик бетону методом пружного відскоку	126
Савицький В.В. Експериментальні дослідження параметрів роботи збірно- монолітних нерозрізних залізобетонних балок за дії повторних навантажень	130
Савицький В.В., Кочкар'юв І.Д. Вплив осідання фундаментів на внутрішні зусилля каркасів будівель	134

Стрельцов К.О., Горбовий О.Л., Барабаш І.В. Вплив механоактивації змішаного цементу на екзотермічний розігрів і міцність цементного каменю	139
Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Ющенко А.В. Дослідження ефективності вогнезахисту текстильних матеріалів гідрофобним покриттям	145
Цапко Ю.В., Бондаренко О.П., Цапко О.Ю., Ющенко А.В. Особливості енергії активації термічно-модифікованої деревини	148
Meneiliuk O.I., Russyi V.V., Bochevar K.I. Implementation of new structural and technological solutions into existing construction production	151

Наукове видання

**«МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ
БУДІВЕЛЬНИХ КОМПОЗИТИВ» (Семинар МОБК)**

Збірка тез доповідей
міжнародної науково-технічної конференції

(українською та англійською мовами)

Одеська державна академія
будівництва та архітектури (ОДАБА)

05-06 грудня 2024 р.

Технічний редактор *Довгань О.Д.*

Підписано до друку 12.12.2024 р.
Формат 60×84/16 Папір офісний Гарнітура Times
Цифровий друк. Ум.-друк. арк. 9.3
Наклад 50 прим. Зам. №24-111К

Видавець і виготовлювач:
Одеська державна академія будівництва та архітектури
Свідоцтво ДК № 4515 від 01.04.2013 р.
Україна, 65029, м. Одеса, вул. Дідріхсона, 4.
тел.: (048) 729-85-34, e-mail: rio@odaba.edu.ua

Надруковано в авторській редакції з готового оригінал-макету
в редакційно-видавничому відділі ОДАБА