

Шинкевич О.С., Бондаренко Г.Г. *, Чеський Ю.В. **, Койчев О.О., Олійник Т.П.

Одеська державна академія будівництва та архітектури
(ул. Дидрихсона, 4, Одеса, 65000, Україна; e-mail: elena_shinkevich@ukr.net)

* Миколаївський будівельний коледж

(вул. 1-а Слобідська, 2, Миколаїв, 54000, Україна)

** Одеський національний політехнічний університет
(пр-т Шевченка, 1, Одеса, 65044, Україна)

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СИЛІКАТНІ КОМПОЗИТИ ПІДВИЩЕНОЇ ТРІЩИНОСТІЙКОСТІ

Розробка виробництва стінових виробів і матеріалів на вапняно-кремнеземистому композиційному в'язучому з використанням місцевої природної сировини на основі ефективних ресурсозберігаючих технологій є перспективним напрямком будівельної галузі. Робота спрямована на вивчення та регулювання процесів формування структури в активованих вапняно-кремнеземистих сумішах і вивчення властивостей композитів на їх основі, включаючи параметри механіки руйнування, для отримання стінових виробів підвищеної деструктивної стійкості по литевій енергозберігаючій технології. Встановлено, що управління процесами формування структури шляхом спрямованого регулювання відносної величини об'ємних змін, властивих високорухливим сумішам, що містять як компонент в'язучого негашене вапно, забезпечить підвищення деструктивної стійкості і ефективності силікатних композитів. Проаналізована зміна міцнісних і деформативних властивостей, а також структури під впливом величин питомої поверхні трепелу, як компоненту в'язучого, і режимів твердіння. На основі проведених досліджень показано, що комплексну оптимізацію складів раціонально проводити з урахуванням закономірностей зміни тріщиностійкості, модуля пружності та інших запропонованих узагальнюючих показників, що дозволяє прогнозувати якість виробів з більш високим ступенем вірогідності. Модуль пружності, який звичайно нормується в практичних розрахунках конструкцій, застосовано також при оптимізації складів вапняно-кремнеземистих сумішей для прогнозу деструктивної стійкості композитів. Показано, що зміна експлуатаційних властивостей у часі може лімітувати деструктивну стійкість бетонів і ці показники необхідно враховувати при оптимізації складів і технологічних режимів виготовлення.

Ключові слова: силікатні композити, тепловологісна обробка, комплексна активація, об'ємні зміни, тріщиностійкість, експериментально-статистичні моделі, комп'ютерне матеріалознавство, багатокритеріальна оптимізація.

Вступ. Дефіцит енергетичних і мінеральних ресурсів вимагає розробки малоенергоємних і прогресивних технологій виробництва будівельних матеріалів і виробів. Аналіз проблеми показав, що роль безклінкерних в'язучих та силікатних виробів знову зростає, тому подальше вдосконалення технології виробництва та підвищення ефективності цих матеріалів має важливе науково-практичне значення.

Термодинамічне обґрунтування можливості отримання силікатних матеріалів неавтоклавного твердіння викладено в працях В.І.Бабушкіна і О.П.Мчедлова-Петросяна [1,2]. При виробництві матеріалів і виробів на безклінкерних в'язучих речовинах застосовується широкий спектр варіантів

активації процесів їх твердіння. Відмінність їх полягає в різній енергоємності та технологічній складності використання в будівельній практиці. Так, налагоджено промислове виробництво конструктивно-теплоізоляційних стінових виробів неавтоклавного твердіння на активованому вапняно-вулканічному в'язучому [3], стінових блоків з газосилікату неавтоклавного твердіння на активованому вапняно-перлітовому в'язучому і зол гідровидалення [4]. Запропоновані нові хімічні активатори і методи активації дозволяють на 15-30% скоротити цикл ТВО [5]. Економічна ефективність за рахунок відмови від дорогого цементу складає 32%.

Відомі способи модифікування поверхні заповнювачів шляхом її обробки фізичними методами [4,6-9]. Застосування безавтоклавної технології для виготовлення виробів на активованих в'язучих та заповнювачах забезпечує зниження енерговитрат на виробництво на 20-30%, а собівартість – на 15-20%.

Регулювати якість поверхні заповнювачів можливо хімічними методами, а ефективно управляти міжфазними взаємодіями в дисперсних системах і якістю виробів на їх основі можливо з використанням наповнювачів різної природи [10-14]. За рахунок підвищення міцності адгезійних контактів в бетонах, які активовані лужним компонентом, збільшується довговічність та морозостійкість композитів [15-17]. Міцність силікатних виробів з модифікованими наповнювачами на 20-25% вище в порівнянні з бетонами на немодифікованих заповнювачах.

Однак до теперішнього часу відсутні загальні закономірності впливу на властивості твердіючих і затверділих композитів залишкових змін об'єму активованого ВК в'язучого, яке містить негашене вапно. Крім того, при досить значних дослідженнях властивостей міцності безклінкерних бетонів, мало вивчені їх деформаційні властивості і параметри механіки руйнування які, як відомо, впливають на деструкційну стійкість матеріалів і виробів усіх видів.

Виробництво стінових виробів і матеріалів на безклінкерних в'язучих з використанням місцевої природної сировини на основі ефективних ресурсозберігаючих технологій є перспективним напрямком будівельної галузі. У зв'язку з цим робота, яка спрямована на вивчення та регулювання процесів формування структури в активованих вапняно-кремнеземистих сумішах і вивчення властивостей композитів на їх основі, включаючи параметри механіки руйнування, для отримання стінових виробів підвищеної деструктивної стійкості по литевій енергозберігаючій технології, є актуальною.

Мета досліджень. Підвищення деструктивної стійкості вапняно-кремнеземистих композитів шляхом спрямованого

регулювання об'ємних змін суміші і рівнів експлуатаційних властивостей за рахунок оптимізації складів і технологічних режимів.

Матеріали і методи досліджень. Для отримання багатокомпонентного вапняно-кремнеземистого в'язучого використано: повітряне вапно, яке мелене спільно з кварцовим піском в заданому співвідношенні. Окремо до заданої питомої поверхні подрібнюються трепел аморфно-кристалічної структури.

Для виготовлення бетонів на основі трьохкомпонентного в'язучого, в якості дрібнозернистого заповнювача використано немелений кварцовий пісок з модулем крупності $M_k=1.2$ (ДСТУ Б.В.2.7-32-95 та ДСТУ Б.В.2.7-7.5-98). Як водорегулюючий компонент використана добавка на основі сульфатних нафталінформальдегідних поліконденсатів – суперпластифікатор С-3 (ТУ2481-001-51831493-00). Високорухливі бетонні суміші готувалися в швидкісному змішувачі-активаторі ($n=2400 \text{ хв}^{-1}$).

Структурно-реологічні властивості суміші оцінювалися ефективною в'язкістю, її об'ємними змінами (розширення та усадка) та термінами тужавлення. Ефективна в'язкість суміші вимірювалася на віскозиметрі з коаксіальними циліндрами в діапазоні градієнтів швидкості деформацій $1 < \dot{\gamma} < 134 \text{ с}^{-1}$. Об'ємні зміни, викликані збільшенням об'єму негашеного меленого вапна, що входить до складу трьохкомпонентного в'язучого, оцінювалися за стандартною методикою (ДСТУ EN 196-3:2007).

Кількісна оцінка елементів структури: мікротвердість визначалася на мікротвердометрі – ПМТ-3 і оцінювалася числом твердості H (Н/мм^2); характер пористості – за методикою Брусера; пористість – за стандартними методиками.

Міцність при стиску визначалася за ДСТУ Б.В.2.7-23-95. Усадка визначалася за стандартною методикою (ГОСТ 24544-81). Морозостійкість визначалася за ДСТУ Б.В.2.7-48-96, тріщиностійкість (критичний коефіцієнт інтенсивності напружень) – ГОСТ 29167-91, модуль пружності – на низькочастотному УЗК.

Результати досліджень. При виготовленні композитів застосована комплексна активація вапняно-кремнеземистих сумішей [12]. Одним з застосованих видів комплексної активації є гідроактивація. Вона є різновидом механохімічної активації, здійснюється в рідкому середовищі та супроводжується зниженням в'язкості суміші без зміни її водопотреби [12].

Проаналізована зміна в'язкості вапняно-кремнеземного в'язучого і суміші на його основі в процесі гідроактивації. В результаті попередніх експериментальних досліджень встановлено, що введення в змішувач-активатор дрібнозернистого заповнювача підвищує ефективну в'язкість суміші в 2-2.5 рази. Однак, в процесі механохімічної активації ефективна в'язкість суміші з дрібнозернистим заповнювачем знижується більш ніж в 3 рази і досягає в'язкості неактивованої суспензії в'язучого.

Даний ефект зниження в'язкості компенсує її підвищення внаслідок введення в суміш пористої мінеральної добавки аморфної структури та зміни її питомої поверхні. В результаті введення в суміш мінеральної добавки ефективна в'язкість суміші підвищується не більш ніж на 10%, проте відомо, що раніше виготовлення силікатних неавтоклавних виробів по литтєвій технології з використанням пористих добавок без активації призводило до суттєвого підвищення водопотреби сумішей і, як результат, до зниження морозостійкості виробів. Таким чином, навіть при введенні в суміш кремнеземвмісного компонента з сильно розвиненою площею поверхні, спільно з дрібнозернистим заповнювачем, в'язкість гідроактивованої суміші нижче в'язкості неактивованої суміші в 2-3 і більше разів, що обумовлює отримання високорухливих ($OK=12-15$ см) і литих ($OK \geq 15$ см) сумішей [12].

Для оцінки впливу складу в'язучого і суміші на об'ємні розширення (z) і усадочні деформації (ϵ) було проведено натурний експеримент. Експеримент поставлено по чотирьохфакторному D-оптимального плану (1) типу МТQ [18], в якому одночасно змінюються три залежних фактори суміші та один незалежний фактор. В якості

факторів суміші варіювався склад композиційного в'язучого, яке складається з меленого негашеного вапна (v_1), кремнеземистого компоненту аморфної структури у вигляді трепелу (v_2) і меленого кварцового піску (v_3). Ці фактори пов'язані лінійною залежністю ($v_1+v_2+v_3=1$) і інтерпретуються у вигляді трикутних діаграм. У якості незалежного фактора варіювалася кількість в'язучого у складі вапняно-кремнеземистої суміші (x_4).

По результатам натурного експерименту розраховані чотирьохфакторні ЕС моделі, що описують зміну даних показників під впливом перерахованих факторів. Закономірність впливу складу в'язучого і суміші на зміну об'ємних розширень описує експериментально-статистична (ЕС) модель (1). Аналогічні ЕС моделі розраховані для зміни усадки і термінів тужавлення.

Оцінена величина відносної зміни об'єму силікатобетонної суміші на основі вапняно-кремнеземистого в'язучого, яке приготовлене з використанням меленого негашеного вапна, під впливом його складу, вмісту дрібнозернистого заповнювача та умов твердіння. В результаті аналізу ЕС моделей встановлено, що величина об'ємних розширень залежить як від складу в'язучого, так і від вмісту дрібнозернистого заповнювача. З підвищенням вмісту заповнювача величина об'ємних розширень знижується з 1.5 до 0.02 мм/м. А при рівних кількостях трепелу і піску по 38% у в'язучому об'ємні зміни в дисперсних системах на чистому піску в 1.5 рази нижче, ніж з трепелом, проте мінімальними значення $z=0.02$ мм/м характеризуються системи, що містять пісок і трепел в рівних кількостях.

За результатами ЕС моделювання підібрані склади, які забезпечують мінімальні значення деформацій розширення на етапі попереднього витримання в н.у. і усадки на стадії ТВО (рис. 1).

Відомо, що при однаковому водовмісті розширюючихся і звичайних бетонів, відносні значення усадки в них однакові за величиною. Тому в вапняно-кремнеземистих сумішах, які здатні розширюватись, деструкційні процеси усадки, які властиві

звичайним бетонам, також протікають, але в збільшеному обсязі суміші.

$$\begin{aligned}
 & a) \\
 & +3,398v_1 - 5,328v_1v_2 \\
 & z = +0,847v_2 + 3,618v_1v_3 + \\
 & +0,597v_3 + 1,607v_2v_3 \\
 & -0,511v_1x_4 + 0,242x_4^2 \\
 & + \quad \quad \quad \mp 0v_2x_4 \\
 & +1,845v_3x_4
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

б)

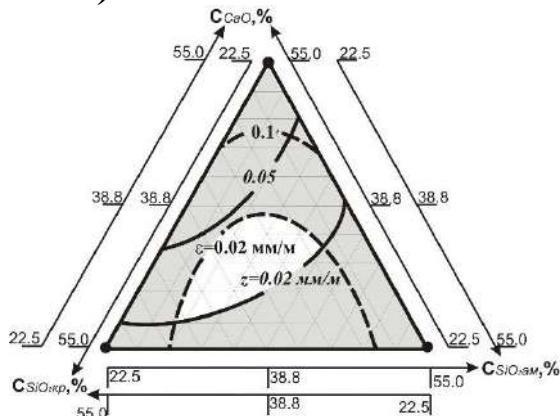


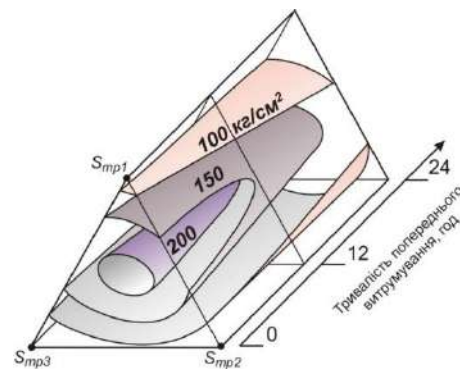
Рис. 1. Експериментально-статистична модель зміни об'ємних розширень z під впливом складів в'язучого та суміші – (а); оптимальні склади в'язучого, що забезпечують отримання малоусадочних вапняно-кремнеземистих композитів (область не заштрихована) – (б).

В даному випадку гідроактивація вапняно-кремнеземистої суміші супроводжується зниженням її водовмісту з $V/T=0.44$ до $V/T=0.33$, що, в свою чергу, забезпечує формування структури з мінімальною величиною залишкових деформацій. Причому, мінімальне значення усадки $\varepsilon=0.02$ мм/м відповідають складам з максимальною величиною розширення $z=0.1\%$ (рис. 1б), в даній області залишкові деформації (різниця величин розширення та усадки) $\Delta\varepsilon \rightarrow 0$. Встановлено, що терміни тужавлення регулюються в межах: початок тужавлення – не раніше $45 \div 65$ хв.; кінець – не пізніше $15 \div 20$ год. Для даних композитів міцність при стиску змінюється від 9.5 до 21 МПа. Величина коефіцієнту кореляції свідчить про тісний кореляційний зв'язок міцності з деформаціями розширення та усадки $r\{R_{ct}; z\}=+0.97$, $r\{R_{ct}; \varepsilon\}=-0.98$ в даній області експерименту.

У ході наступного експерименту, в якому варіювалися тривалість попереднього витримування $\tau_{п.в.}$ і питома поверхня

одного з компонентів в'язучого (трепелу) $v_1 - S_{тр1} = 350 \text{ м}^2/\text{кг}$, $v_2 - S_{тр2} = 425 \text{ м}^2/\text{кг}$, $v_3 - S_{тр3} = 500 \text{ м}^2/\text{кг}$ (план 2) встановлено, що вплив даних факторів сприяє: підвищенню міцності більш ніж в 2 рази (рис. 2а); міцності на розтяг при згині – в 1.25 рази; збільшує водостійкість з $k_p=0.8$ до $k_p=0.9$; модуль пружності змінюється в діапазоні $E=(37-42) \cdot 10^3 \text{ МПа}$. При цьому відзначено поліпшення структурних параметрів: сповільнюється кінетика водопоглинання, знижується загальне водопоглинання з $W_0=7-8\%$ до $W_0=4-5\%$. Попереднє витримування в н.у. не допускає розігріву суміші, що твердіє, вище 40°C і інтенсивного випаровування води. Тривалість попереднього витримування, як технологічний етап, дозволяє розділити в часі повністю або з частковим накладенням деформації розширення та усадки, які характеризуються різноспрямованими в просторі градієнтами.

а)



б)

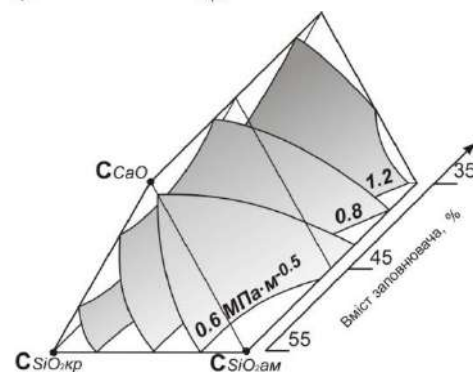


Рис. 2. Зміна R_{ct} під впливом питомої поверхні трепелу $S_{тр}$ та тривалості попереднього витримування в н.у. – (а); критичного коефіцієнту інтенсивності напруження k_{Ic} складу та вмісту вапняно-кремнеземистого в'язучого – (б).

На основі проведених досліджень встановлено оптимальні склади в'язучого та суміші, які забезпечують мінімальну величину залишкових деформацій ($\varepsilon \ll 0.02$

мм/м): співвідношення у в'язучому кристалічного $\text{SiO}_2^{\text{кр}}$ і аморфного $\text{SiO}_2^{\text{акт}}=1:1$, з коефіцієнтом розсунення зерен $\text{KPЗ}=0.35$. Вміст добавки $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}=4\%$. Обґрунтовано, що етап попереднього витримання в н.у. для вапняно-кремнеземистих сумішей є важливою технологічною операцією, яка не потребує додаткових матеріальних витрат, обумовлює формування структури з мінімальними значеннями залишкових деформацій та сприяє підвищенню деструктивної стійкості композитів.

На базі встановленого кількісного складу в'язучого і суміші, досліджено основні характеристики структури і властивості композитів: міцність при стиску $R_{\text{ст}}$, модуль пружності E , тріщиностійкість, яка характеризувалася коефіцієнтом $k_{\text{Іс}}$, мікротвердість H , а також узагальнюючі показники виду: $\delta R = R^{\text{max}}/R^{\text{min}}$, $\delta E = E^{\text{max}}/E^{\text{min}}$, $\delta k_{\text{Іс}} = k_{\text{Іс}}^{\text{max}}/k_{\text{Іс}}^{\text{min}}$, $\delta H = H^{\text{max}}/H^{\text{min}}$. Даний комплекс показників застосовано для характеристики деструктивної стійкості композитів. З метою розширення бази даних при вирішенні оптимізаційних задач проведено шестифакторний експеримент. В експерименті, поставленому по D-оптимальному плану (3) варіювалися ті самі фактори, що і в другому експерименті (план 2) а також фактори, які були стабілізовані в попередніх експериментах при аналізі просторово-часового характеру процесів розширення та усадки. Зокрема, питома поверхня одного з компонентів в'язучого (трепелу) $v_1 - S_{\text{тр1}}=350\text{м}^2/\text{кг}$, $v_2 - S_{\text{тр2}}=425\text{м}^2/\text{кг}$, $v_3 - S_{\text{тр3}}=500\text{м}^2/\text{кг}$, умови твердіння: тривалість попереднього витримання в н.у. $x_4 - \tau_{\text{п.в.}}=(6\pm 6)$ год., тривалість ТВО при $T = 85^\circ\text{C}$ $x_5 - \tau_{\text{ТВО}}=(10\pm 4)$ год. і вміст добавки гіпсу $x_6 - C_{\text{Г}}=(2.5\pm 2.5)\%$.

На основі розрахованих ЕС моделей встановлено закономірності зміни комплексу властивостей під впливом питомої поверхні мінеральної добавки, умов твердіння та режимів ТВО. По ЕС моделям встановлено, що значення рецептурно-технологічних факторів, які забезпечують максимальні значення міцності, тріщиностійкості, модуля пружності і мікротвердості, не співпадають. Отримані ЕС моделі дають можливість розділити вплив технологічних факторів і

складу в кількісному виразі і оцінити цей вплив, як незалежно одне від одного, так і з урахуванням їх взаємодії (табл. 1).

Таблиця 1 - Відносна зміна властивостей під впливом складу та умов твердіння

	Групи факторів		R _{ст}	k _{Іс}	H	E
1.	Розмір питомої поверхні трепелу S _i		2.1	1.6	2.6	1.25
2.	Умови твер- діння:	τ _{п.в}	1.15	1.1	1.6	1.1
		τ _{ТВО}	1.15	1.1	1.5	1.1
3.	Умови твердіння τ _{п.в} , τ _{ТВО} з ураху- ванням взаємодій		2.1	1.5	2.2	1.2
4.	Всі фактори S _i , τ _{п.в} , τ _{ТВО} , C _Г		6.4	3.8	3.0	1.25

Встановлено вплив факторів складу та технології на критичний коефіцієнт інтенсивності напружень $k_{\text{Іс}}$. Так, зміну коефіцієнту інтенсивності напружень $k_{\text{Іс}}$ описує ЕС модель (2) (рис. 3а). Коефіцієнт інтенсивності напружень під впливом всіх шести факторів змінюється в 3.8 рази, причому вплив тривалості попереднього витримання ($\tau_{\text{п.в.}}$) практично рівнозначний впливу тривалості ТВО ($\tau_{\text{ТВО}}$).

а)

$$\begin{aligned}
 k_{\text{Іс}} = & +0,82v_1 \mp 0v_1v_2 \\
 & +1,02v_2 + 0,86v_1v_3 + \\
 & +1,04v_3 \mp 0v_2v_3 \\
 & -0,04v_1x_4 + 0v_1x_5 + 0,12v_1x_6 \\
 & + \mp 0v_2x_4 - 0,067v_2x_5 + 0,13v_2x_6 + (2) \\
 & +0,04v_3x_4 - 0,05v_3x_5 + 0,2v_3x_6 \\
 & +0,089x_4^2 \mp 0x_4x_5 + 0,09x_4^2 \\
 & + +0,081x_5^2 - 0,04x_4x_6 - 0,08x_5^2 \\
 & -0,195x_6^2 + 0,03x_5x_6 - 0,19x_6^2
 \end{aligned}$$

б)

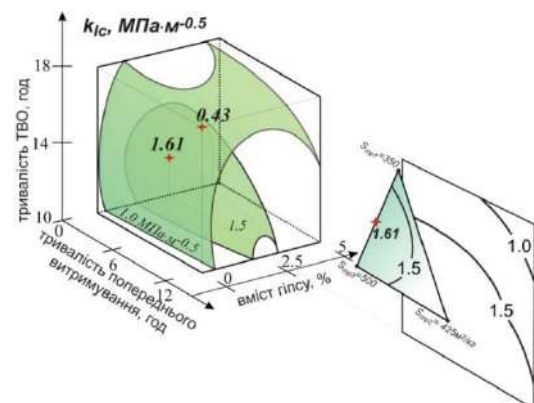
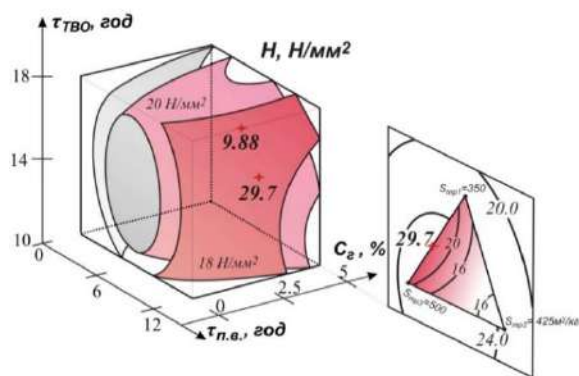


Рис. 3. Експериментально-статистична модель зміни $k_{\text{Іс}}$ під впливом рецептурно-технологічних факторів – (а) та її графічний образ – (б)

Під впливом $\tau_{п.в.}$ і $\tau_{ТВО}$ критичний коефіцієнт напруження k_{Ic} зростає до максимального значення $1.61 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$, потім знижується. Максимальною тріщиностійкістю володіють зразки на складах з питомою поверхнею трепелу $S_{тр1}=350 \text{ м}^2/\text{кг}$, що може свідчити про можливе гальмування мікротріщин частками трепелу великої фракції.

Оптимальні технологічні режими обробки цих складів наступні: $\tau_{п.в.}=(1 \div 1.5)$ год. і $\tau_{ТВО}=(12 \div 14)$ год. (рис. 3б). З іншого боку, збільшення тривалості $\tau_{п.в.}$ і $\tau_{ТВО}$ понад оптимальні значення та зменшення розміру частинок до $S_{тр3}=500 \text{ м}^2/\text{кг}$ веде до зниження k_{Ic} , що може бути пов'язано, як показують електронно-мікроскопічні дослідження, з формуванням в даних умовах зони передруйнування на контакті матриці з заповнювачем.

а)



б)

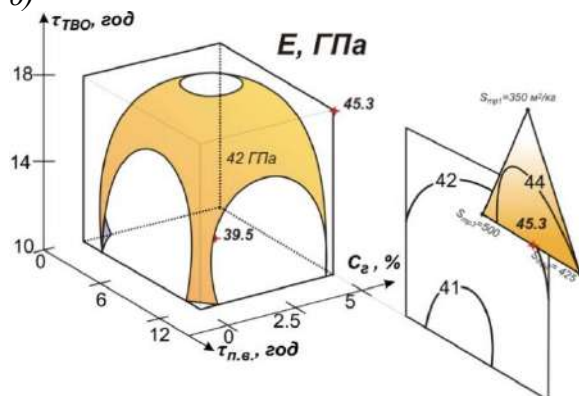


Рис. 4. Зміна мікротвердості H (а) і модуля пружності E (б) під впливом рецептурно-технологічних факторів

Крім того, оптимальна структура, яка забезпечує максимальне значення k_{Ic} , не забезпечує максимальне значення мікротвердості H (рис.4а), що також є непрямым по-

казником того, що розвиток тріщин відбувається на контакті матриці з заповнювачем. Встановлено, що гідроактивація поверхні дрібнозернистого заповнювача, сприяє підвищенню мікротвердості на безклінкерній матриці в'язучого в 1.3 рази в порівнянні з неактивованим заповнювачем.

Отримано також залежності зміни k_{Ic} від виду ініціювання тріщини. Відношення величин k_{Ic} із закладеною і розпиляною тріщинами відрізняється в 1.9 рази залежно від факторів, які впливають, що пов'язується з перерозподілом напруг при різних варіантах ініціювання тріщин. Найбільша різниця отримана на суміші дрібної і крупної фракції мінеральної добавки.

На основі ЕС моделі зміни k_{Ic} , розрахованої за планом 1, встановлено, що зі збільшенням кількості дрібнозернистого заповнювача (ДЗЗ) значення k_{Ic} зростає до величини $1.5 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{-0.5}$ (рис. 2б), що вище відомого значення $k_{Ic}=1$ для цементних дрібнозернистих бетонів (ДЗБ). Про пропорційну залежність k_{Ic} від вмісту ДЗЗ для вапнякових-кремнеземистих і цементних ДЗБ свідчить про можливу ідентичність механізмів тріщиноутворення в цих композитах. Зі збільшенням кількості ДЗЗ зростає вірогідність гальмування мікротріщин зернами заповнювача.

На основі обчислювальних експериментів встановлено, що вплив на міцність при стиску тривалості попереднього витримання і режимів ТВО в кількісному вираженні рівнозначний. Спільний вплив цих факторів забезпечує збільшення міцності в 2.1 рази, під впливом кожного фактора окремо $\tau_{п.в.}$ і $\tau_{ТВО}$ $R_{ст}$ збільшується в 1.15 рази. Максимальне значення $R_{ст}=22.3 \text{ МПа}$ досягнуто при $\tau_{п.в.}=1.5$ год. і $\tau_{ТВО}=11$ год. Оптимальний вміст добавки гіпсу 4%.

Зростання міцності супроводжується збільшенням у твердій фазі мінералу фошагіту і оптимальним співвідношенням гілленбрандіта В і С (утворення цих видів ГСК йде практично без збільшення об'єму твердої фази). Співвідношення $\delta R_{ст}=R_{ст}^{max}/R_{ст}^{min}$ використано при оптимізації складів і режимів твердіння як одна з характеристик деструктивної стійкості. Прагнення узагальнюючого показника

$\delta R_{ст} \rightarrow 1$ визначає підвищення деструктивної стійкості і гарантує високу стабільність властивостей при можливих технологічних погрішностях складів в процесі дозування компонентів, а також при погрішностях режимів технології (рис. 5а).

Встановлено вплив факторів складу та технології на модуль пружності (рис. 4б). Модуль пружності змінюється в 1.2 рази. Вплив тривалості ТВО і тривалості витримування в н.у. на E також як і на $R_{ст}$ – рівнозначний, однак оптимальний вміст добавки гіпсу для отримання E^{max} складає 5%. Значення модуля пружності, яке відповідає значенню E для дрібнозернистих цементних бетонів $E=25$ ГПа, досягається при $\tau_{п.в.}=6$ год. і $\tau_{ТВО}=10$ год., при тому ж вмісті добавки гіпсу. А значення $E=35$ ГПа, яке відповідає значенню E для звичайних важких бетонів, досягається при тих же значеннях $\tau_{п.в.}$ і $\tau_{ТВО}$, але на суміші кремнеземистого компонента з $S_{тр2}$ і $S_{тр3}$ в рівних кількостях (рис. 4б). Ці склади відрізняються характером пористості: відносний середній розмір капілярів в першому випадку d_k ($E=35$ ГПа) $=0.85 > d_k$ ($E=25$ ГПа) $=0.6$, коефіцієнт однорідності розподілу пор за розмірами: α_k ($E=35$ ГПа) $=0.2 < \alpha_k$ ($E=25$ ГПа) $=0.38$, при цьому вміст тоберморитового гелю в цих складах становить 15%. Максимальне значення E 45.2 ГПа досягнуто при $\tau_{п.в.}$ 12 год. і $\tau_{ТВО}=18$ год.

У досліджуваному діапазоні варіювання всіх шести чинників зв'язок міцності і деформативних властивостей має виражений нелінійний характер. У досліджуваній області зміни $R_{ст}$ у 6.4 рази відповідає зміна E в 1.2 рази, тобто $\delta R_{ст}$ в 5 разів перевищує δE (рис. 5б). У ході обчислювальних експериментів встановлено, що під впливом умов твердіння та режимів ТВО при постійній $R_{ст} = \text{const} = 20$ МПа значення ΔE становить 10% ($39.1 \div 43.6 \cdot 10^3$ МПа), при більш низьких значеннях $R_{ст} = \text{const} = 15$ МПа значення ΔE складає 12% при незмінній міцності $R_{ст} = 15$ МПа одночасно варіюється склад і фактори технології, $\Delta E = 5\%$.

Таким чином, технологічні режими необхідно призначати з урахуванням формування оптимальних структур для комплексу аналізованих властивостей та необхідних вимог до матеріалу.

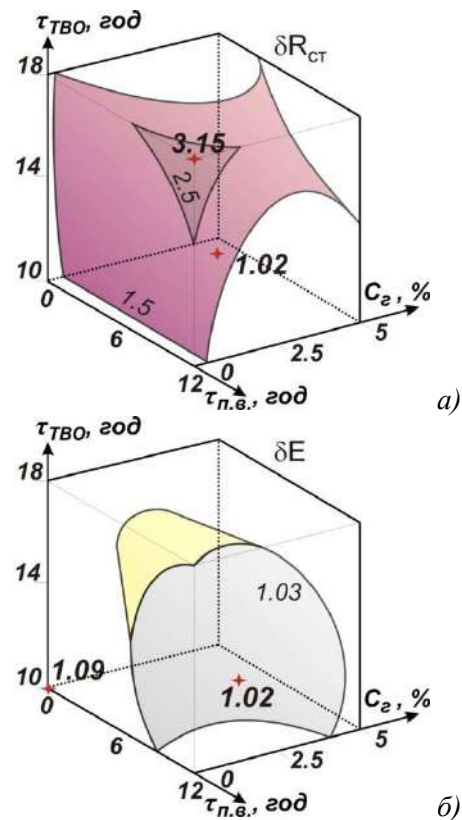


Рис. 5. Оцінка деструктивної стійкості композитів по узагальнюючим показникам: а) – $\delta R = R^{max}/R^{min}$; б) – $\delta E = E^{max}/E^{min}$.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі проведених досліджень показано, що комплексну оптимізацію складів раціонально проводити з урахуванням закономірностей зміни тріщиностійкості та інших узагальнюючих показників, що дозволяє прогнозувати якість виробів з більш високим ступенем вірогідності. Модуль пружності, який звичайно нормується в практичних розрахунках конструкцій, застосовано при оптимізації складів вапняно-кремнеземистих сумішей також для прогнозу деструктивної стійкості композитів. Модуль пружності E через 2.5 року підвищується на 10-20%, або може знизитись на дану величину в залежності від складу. Таким чином, зміна експлуатаційних властивостей у часі може лімітувати деструктивну стійкість бетонів і дані показники необхідно враховувати при оптимізації складів і режимів.

Подальші дослідження будуть направлені на дослідження і аналіз впливу наномодифікаторів на структуру і властивості силікатних композитів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Бабушкин В.И., Мчедлов-Петросян О.П. Силикатные водостойкие изделия. – Киев, 1962. – 100с.
2. Бабушкин В.И., Матвеев Г.М., Мчедлов-Петросян О.П. Термодинамика силикатов. – М.: Стройиздат, 1986. – 407с.
3. Бадалян М.Г. Стеновые изделия неавтоклавного твердения на активированном известково-вулканическом вяжущем / М.Г. Бадалян, П.А. Тер-Петросян // Современные проблемы строительного материаловедения и технологии/ Материалы м.н. конгресса: Наука и инновации в строительстве SIB 2008. – Воронеж, 2008. – Том 1. Кн. 1. – С.321-332.
4. Сулименко Л.М., Урханова Л.А. Пути снижения энергетических затрат на производство известково-кремнеземистых вяжущих веществ // Строительные материалы. – Москва, 2006. – № 3. – С.63-65.
5. Аввакумов Е.Г. Механические методы активации химических процессов. – Новосибирск: Наука, 1986. – 263с.
6. Davidovits J. Chemistry of Geopolymeric System Terminology / Davidovits J.// Geopolymer 1999.Saint – Quentin,France. – P. 9-40.
7. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. 3rd edition – 2011. Saint – Quentin, France. – 620 p.
8. Гидратация цемента, активированного током высокого напряжения / Бабушкин В.И., Матвиенко В.А., Васюкевич С.Г., Лагунов Ю.А. // Известия ВУЗов. Строительство, 1993. – №2. – С. 47-50.
9. Матвиенко В.А., Толчин С.М. Электрические явления и активационные воздействия в технологии бетона. – Макеевка, 1998. – 154с.
10. Дворкин Л.И., Дворкин О.Л., Корнейчук Ю.А. Эффектные цементно-зольные бетоны. – Ровно, 1998. – 195с.
11. Vinnichenko V., Krot A., Vitsenko N. Theoretical and experimental research into manufacturing of silicate products without thermal treatment // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Technology organic and inorganic substances, 2016. – Vol 5, No 6 (83). – P. 29-36. <http://journals.uran.ua/ee-jet/article/view/79465>
12. Сучасні будівельні матеріали та їх технології: Монографія. / О.С. Шинкевич, Є.С. Луцкін, О.О. Койчев та ін.: за ред. О.О. Шишкіна – Кривий Ріг: Залозний В.В. 2017. – 282 с.
13. Shinkevich E. The influence of modification of the structure of silicate materials on their properties after non-autoclaved hardening / E. Shinkevich, E. Lutskin, O. Gnyp, A. Koichev, J. Dotsenko / Proceedings of the 8th International Symposium Brittle Matrix Composites 8. – Cambridge and Warsaw – 2006. – P.517-525.
14. Шинкевич Е.С. Экспериментально-статистические методы исследования проблем механики разрушения / Е.С. Шинкевич // Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов: сб. науч. ст. по матер. 7-й междунар. науч. конф. в 2 т. / РААСН, Воронежский ГАСУ. – Воронеж, 2013. – Т.2. – С. 181-194.
15. Кривенко П.В., Пушкарева Е.К., Гоц В.И., Ковальчук Г.Ю. Цементы и бетоны на основе топливных зол и шлаков: Монография. – Киев: издательство ООО «ИПК Экспресс-Полиграф», 2012. – 258с.
16. Інноваційні технології в архітектурі і дизайні: Монографія: під загальною редакцією В.П. Сопова, В.П. Мироненка. – Харків, 2017. – 668 с. / Розділ в колективній монографії: Експериментально-статистический анализ влияния щелочной активации на свойства силикатных композитов / О.С. Шинкевич, Є.С. Луцкін, О.О. Койчев, І.М. Мироненко. – С.404-416.
17. Lutskin, Y. Aerated Complex Activated Composites on Silicate Matrix of Thermal-moisture Hardening [Електронний ресурс] / E. Shinkevich, Y. Lutskin, Y. Mariyanko // Proceeding of 14th International Congress on the Chemistry of Cement / Abstract Book. – Beijing, China, 2015. – Volume 2. – P.632. – Режим доступу: <http://www.sciinfo.cn/ShowDetail.aspx?d=1019&id=HYCIC201604180000005214&m=>.
18. Вознесенский В.А. ЭВМ и оптимизация композиционных материалов / В.А. Вознесенский, Т.В. Ляшенко, Я.П. Иванов, И.И. Николов. – Киев: Будивельник, 1989. – 240 с.

Шинкевич Е.С., Бондаренко Г.Г., Чесский Ю.В., Койчев А.А., Олейник Т.П. ЕНЕРГОЕФФЕКТИВНЫЕ СИЛИКАТНЫЕ КОМПОЗИТЫ ПОВЫШЕННОЙ ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ. Разработка производства стеновых изделий и материалов на известково-кремнеземистом композиционном вяжущем с использованием местного природного сырья на основе эффективных ресурсосберегающих технологий является перспективным направле-

нием строительной отрасли. В связи с этим работа, направленная на изучение и регулирование процессов формирования структуры в активированных известково-кремнеземистых смесях и изучение свойств композитов на их основе, включая параметры механики разрушения, для получения стеновых изделий повышенной деструктивной стойкости по литьевой энергосберегающей технологии.

Ключевые слова: силикатные композиты, тепловлажностная обработка, комплексная активация, объемные изменения, трещиностойкость, экспериментально-статистические модели, компьютерное материаловедение, многокритериальная оптимизация.

Shynkevych O., Bondarenko G., Tchesskii Yu., Koichev O., Oliinyk T. ENERGY-EFFICIENT SILICATE COMPOSITES OF INCREASED CRACK RESISTANCE. Production of wall materials and products for lime-silica binders of heat and moisture treatment using local natural resources through efficient, resource-saving technologies is a promising direction of the construction industry. In connection with this work to study and control of the processes of structure formation in activated lime-silica mixtures, and studying the properties of composites based on them, including the parameters of fracture mechanics, for walling products increased the destructive strength of the casting energy-saving technology.

Keywords: silicate composites, heat and moisture treatment, complex activation, volume changes, crack resistance, experimental-statistical models, computer material science, multicriteria optimization.

DOI: 10.29295/2311-7257-2018-92-2-197-203
УДК 691.5

Бондаренко О.П., Павлюк В.В.

*Київський національний університет будівництва і архітектури
(Повітрофлотський пр-т, 31, Київ, 03680, Україна; e-mail: vitalii_wolf@ukr.net, bondolya3@gmail.com)*

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ ШЛАКОПОРТЛАНДЦЕМЕНТНИХ В'ЯЖУЧИХ СИСТЕМ, МОДИФІКОВАНИХ ЛУЖНИМИ СПОЛУКАМИ ТА ПЛАСТИФІКУЮЧИМИ ДОБАВКАМИ РІЗНИХ ТИПІВ

В роботі досліджено процеси структуроутворення шлакопортландцементних в'язучих систем, модифікованих лужними сполуками та пластифікуючими добавками. Встановлено, що активація шлакопортландцементу лужною складовою у комплексі з пластифікуючими добавками приводить до направлено синтезу низькоосновних гідросилікатів кальцію, піктоліту, афвіліту, скоутиту і незначної кількості кальцієвого хондродіту. При цьому, як свідчать результати термoporометрії, відбувається зміна порової структури: збільшується вміст гелевих пор та відповідно зменшується частка капілярних. Утворення такої мікроструктури модифікованого шлакопортландцементу сприяє утворенню цементного каменю з покращеними міцнісними показниками, які на 2 добу перевищують 29,0 МПа, на 7 добу - 43,5 МПа та 61,0 МПа - на 28 добу.

Ключові слова: шлакопортландцемент, комплексні добавки, пластифікатор, міцність, структуроутворення.

Вступ. На сьогоднішній день надійність будівельних матеріалів обумовлюється як правильним вибором вихідних компонентів, так і раціональною технологією виготовлення, що забезпечує не тільки збереження властивостей компонентів, а й утворення нових властивостей, обумовлених проявленням синергетичного ефекту. Різноманітність матеріалів, з яких виготов-

лені матриці та наповнювачі, та схем армування відкриває можливості спрямовано регулювати структурою матеріалу, надавати йому потрібних експлуатаційних та спеціальних властивостей [1]. Використання композиційних в'язучих систем з максимально можливим вмістом техногенної сировини для отримання таких бетонів забезпечить мінімальні витрати енергії на всіх етапах виготовлення і застосування та