

О. Г. Дрючко, О. В. Шефер, С. Г. Кислиця, В. М. Галай, О. В. Сухоребрий

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

РОЗРОБКА АДАПТИВНИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ ТЕРМІЧНОЮ ПОРИЗАЦІЄЮ ЛУЖНО-СИЛІКАТНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ ВИРОБІВ ТА З'ЯСУВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ РЕЖИМІВ ЇЇ ВІДТВОРЕННЯ

Анотація. Запропоноване дослідження спрямоване на розроблення й реалізацію адаптивної системи зонованого управління режимами термооброблення вихідної кремній-вмісної високо модульної сирцевої маси і з'ясування умов відтворення якісних водостійких теплоізоляційних виробів із жорсткою поризованою структурою на основі розчинного скла та мінеральних наповнювачів техногенного походження (відходів вугле-енергетичного комплексу). Інноваційність й актуальність запропонованих технічних рішень базуються на з'ясованих авторами властивостях, що виявляються композиціями; експлуатаційних особливостях та ефективності даного типу неорганічних утеплювачів з низькими значеннями умовної густини, теплопровідності здатними зберігати достатню міцність структури; легкій керованості процесів спінювання й твердіння у широких межах складу композицій. Запропонований варіант типу управління, відтворення умов технологічного перетворення, його режимів (послідовність, тривалість, стадійність, температурні межі, інтенсивність і швидкість) зумовлюють особливості поведінки переробляємих лужно-силікатних композиційних систем. Даний варіант відрізняється від відомих рішень складом, рецептурою вихідної сировинної суміші, послідовністю й режимами, стадійністю формування цільового продукту, технологічним оснащенням, розробленими і застосованими засобами керування виробництвом виробів, апаратними і програмними рішеннями їх управління. Виконана робота складається із трьох взаємопов'язаних пошукових емпіричних етапів, що базуються на практичній реалізації послідовної методології і результатів одержання цільових зразків за розробленими тепловими виробничими регламентами з використанням запропонованого комплексу апаратного і програмного забезпечення. Метрологічна якість отриманих результатів і їх достовірність на етапі з'ясування і виявлення цінних для виробництва функціональних властивостей і залежностей забезпечувались використанням програмованих прецизійних систем термоуправління власної розробки; у виробничих масштабах – вибором відповідних серійних засобів.

Ключові слова: адаптивні системи управління, лужно-силікатні композиційні матеріали, термічна поризація, теплофізичні властивості, відтворення регламентних умов, забезпечення метрологічної якості

Вступ

У зв'язку зі зростанням темпів й об'ємів сучасного промислового виробництва великого значення набувають питання, пов'язані зі створенням високопродуктивного переробного обладнання та вдосконаленням чинного. Серед численних промислових напрямів регламентів переробки є і методи виготовлення лужно-силікатних теплоізоляційних жорсткопоризованих матеріалів, отриманих шляхом термічного чи холодного спінювання водних розчинів силікатів лужних металів («рідкого скла») чи твердих лужно-силікатних гідрогелів [1–13]. Їх відносять до інноваційних ефективних неорганічних утеплювачів та вогнетривких теплозахисних матеріалів з широким колом практичних застосувань. Перспективу таких застосунків зумовлюють можливості досягнення низьких значень умовної густини й теплопровідності при збереженні достатньої міцності структури і легкій керованості процесів спінювання й твердіння у широких межах складу композицій. Їх застосування дає можливість хорошого захисту вразливих об'єктів, обладнання від високотемпературних впливів. Вказані переваги базуються на рівноважності і гомогенності основного компоненту сировинної суміші – «рідкого скла» і гідрогелів на його основі.

Композиційні лужно-силікатні пористі теплоізоляційні матеріали як гранульованого, так і блочного типу містять в своєму об'ємі значні кількості газової фази. Існують різні технологічні підходи в

отриманні таких матеріалів при газовиділенні безпосередньо в товщі сформованої композиції. Причому процес газовиділення при високих температурах може бути заснований як на реакціях спеціальних добавок, так і на виділенні парів кристалізаційної і хімічно зв'язаної води.

І у даній роботі приведені власні результати напрацювань авторів у вказаній області.

Постановка завдання. За розробленою рецептурою, вивченими властивостями поведінки сирцевої маси запропонувати режими й технічну реалізацію процесу відтворення якісних водостійких теплоізоляційних матеріалів із жорсткою поризованою структурою на основі «розчинного скла» та мінеральних наповнювачів техногенного походження – відходів вуглеенергетичного комплексу, яка відрізняється від аналогів складом вихідної сировинної суміші, послідовністю й режимами формування цільового продукту, технологічним оснащенням, апаратними і програмними рішеннями їх управління.

Експериментальна частина

Поставлена задача по виготовленню цільового поризованого теплоізоляційного матеріалу реалізується використанням технології гарячого спінювання сирцевої маси, схема одержання якого включає чотири головні стадії:

- 1) підготовку вихідних складових сировинної суміші і гомогенізацію останньої;
- 2) «затворення» композиційної системи «розчинним склом» й утворення стійкого гелю; фраг-

ментування затверділої сирцевої маси і поміщення грануляту у футеровані розбірні форми;

3) нагрівання і переведення речовини заготовок у піропластичний стан (110 – 115 °С);

4) подальше гаряче спінювання і відтворення регулярної поризованої макроструктури композиційних систем (130– 20°С) та формування цільових властивостей продукту перероблення (500–550°С).

Пороутворювачем у цьому випадку є вода (в основному силанольна чи молекулярна, міцно

зв'язана водневими зв'язками з немістковими атомами кисню), що виділяється при термообробленні композиційних систем.

У сировинній суміші використано промислове «розчинне скло», золу-винесення теплових електростанцій усередненого хімічного складу (табл. 1), лежаний портландцемент і додатково – загусник – попередньо підготовлене частково обезводнене затверділе «сухе скло».

Таблиця 1 – Хімічний склад золи-винесення теплових електростанцій, мас. %

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Mn ₃ O ₄	TiO ₂	SO ₃	P ₂ O ₅
51,68	16,75	14,47	0,88	4,38	0,35	2,58	0,04	0,86	4,24	0,49

У приготовлених зразках зола-винесення виявляє хороші армуючі властивості, високу термічну стабільність, достатню стійкість до агресивних середовищ, має малу насипну густину.

При формуванні складу сировинної суміші були враховані також результати покращення водостійкості лужно-силікатних композицій шляхом заміни водозміцнюючих складових двокальцієвого силікату на лежаний портландцемент.

Регулювання швидкості «схвачування» запропонованої сирцевої маси у ході формування ксерогелю кремнієвої кислоти (в залежності від цілей втілюваних завдань) здійснювали варіюванням властивостей загусника.

Оптимізована рецептура приготування сирцевої суміші дозволяє перероблення композицій різними способами з формуванням термоізоляційних матеріалів широкого призначення.

Важливою передумовою їх відтворення з необхідною системою властивостей є строге виконання регламентних вимог, установлених попередніми емпіричними дослідженнями.

Паралельно з розробкою рецептури опробувалась технологія виготовлення зразків.

Визначальним при цьому було виключення стадії гранулювання сировинної маси після термооброблення 110 – 115 °С, використання герметичних закритих форм при їх температурному відпалі та технічне запровадження відтворюваного темпу їх нагрівання. Усвідомлений вибір його оптимального режиму мотивують емпіричні дані із з'ясування особливостей термічного спінювання композиційних систем, одержаних методом диференційно-термічного аналізу (ДТА) на розробленому авторами аналітичному прецизійному комплексі [14] з термоперетворювачами типу К [15], та представлені на рис. 1.

Процес поризації складається із трьох основних етапів, тривалість і характер протікання яких залежить від виду і кількості води, що містить у собі сирцева маса:

– в інтервалі 100 – 110 °С вихідна затверділа композиційна система частково переходить у псевдопіропластичний стан і починає деформування зі збільшенням об'єму;

– в інтервалі 130 – 147 °С відбувається інтенсивне виділення вільної і адсорбованої води та інтенсивна поризація маси зразка;

– при значеннях вище 147 °С спостерігається видалення конституційної вологи, завершення структурної перебудови та фізико-хімічних перетворень композиційних систем.

З аналізу термографічних даних і макроструктури одержаних зразків, можна зробити висновок, що найбільший вклад у формуванні структури виробу з максимальною однорідністю вносить конституційна вода, тоді як видалення надлишку адсорбційної вологи на початкових стадіях приводить до утворення великих наскрізних пор і каналів у сирцевій масі. Тому вихідна рідко-скляна композиція повинна містити мінімальну кількість вільної й адсорбованої води.

Лужно-силікатні композиції у розчинах при нагріванні утворюють низку гідратованих асоціатів з відмінними властивостями (рис. 2). Це дозволяє здійснювати модифікування властивостей загусника сировинної маси – тертого «сухого скла» – частковим обезводненням купованого продукту у рідкому стані при різних значеннях температури, в умовах технологічного циклу формування цільового продукту, одночасно паралельно у тому ж оснащенні, без використання додаткового обладнання. А емпірично з'ясовані фізико-хімічна поведінка композиційних силікатних систем, особливості обезводнення і проходження в'язкопластичного стану, факт сильного прилипання проміжних продуктів перетворення до металів, кераміки, скла дозволяють запропонувати технологічні регламенти, стадійність, послідовність операцій у ході оброблення, розробку і вибір матеріалів оснащення, варіації способів одержання і використання поризованих цільових композитів.

Лабораторна практика свідчить, що виникає потреба у знаходженні ефективного способу регулювання швидкості гелеутворення способами зміщення рівноваги фізико-хімічних процесів обезводнювання дисперсних систем та вибором темпу термооброблення, а регулярність пороутворення в об'ємі зразків знаходженням «швидкості відповідності» термовпінювання у конкретному переробленні.

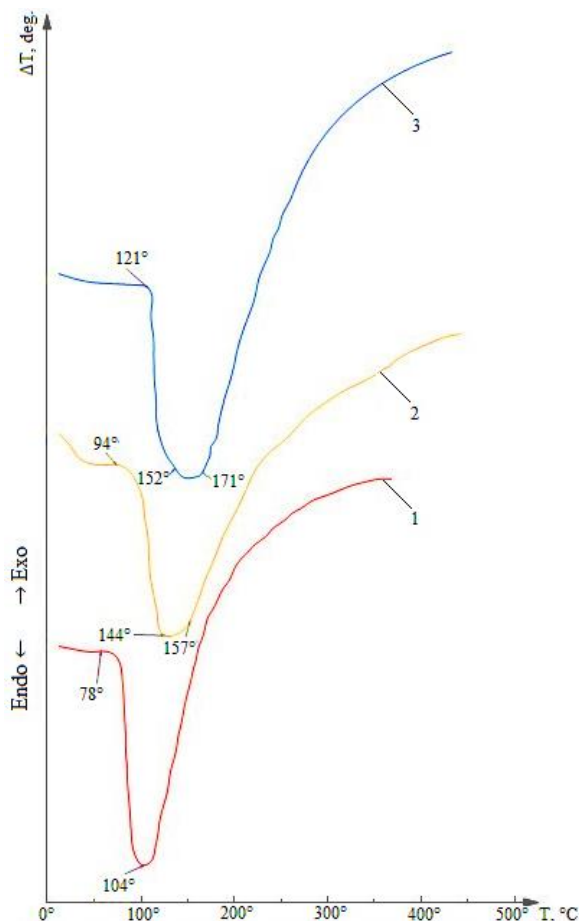


Рис. 1. Термограми ДТА ксерогелів натрієвих рідко-скляних композитів в координатах $\Delta T - T$, записані при нагріванні зразків в адекватних умовах з різною швидкістю: крива 1 – 4 град. / хв.; крива 2 – 7 град. / хв.; крива 3 – 20 град. / хв.

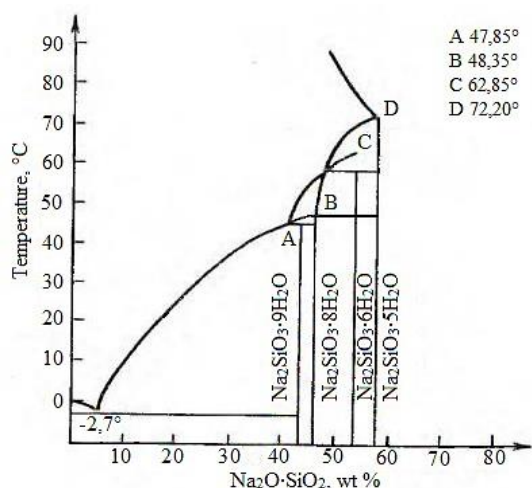


Рис. 2. Розчинність у системі $\text{Na}_2\text{O} - \text{SiO}_2 - \text{H}_2\text{O}$ [6]

Послідовні підпроцеси перероблення високомодульних силікатних композиційних систем. Розробка регламентів

Методологія послідовного перероблення включає послідовні підпроцеси:

1) підготовку вихідних складових сировинної суміші перетиранням, розмелюванням, просіюван-

ням через сито (80-315 мкм): золи-винесення ТЕС, лежалого портландцементу, частково обезводненого "сухого скла", висушеного при заданій, згідно із запропонованим регламентом перероблення композиційної системи, температурі (105, 190°C);

2) приготування наважок складових сировинних порошкових компонентів і дозованого об'єму розчинного скла -"затворювача", згідно з відпрацьованою оптимізованою рецептурою;

3) гомогенізацію порошкових складових сировинної суміші ретельним змішуванням;

4) "затворення" сировинної маси розчинним склом, перемішування до загущення композиції й утворення стійкого гелю за звичайних умов;

5) механічне фрагментування затверділого пластичного коржа на окремі елементи заданих розмірів, форми і конфігурації, з урахуванням коефіцієнта спучення (залежно від особливостей вирішуваних задач);

6) поміщення фрагментованих елементів у футеровану форму з необмеженим об'ємом на термостійкий полімерний піддон окремо (чи обмеженої конструкції розбірної форми);

7) нагрівання зі швидкістю 4-7 град. / хв. і переведення речовини гранульованих заготовок у піропластичний стан (110-115 °С, витримка 15 хв., можливе ущільнення) з наступним двостадійним термообробленням - гаряче спінювання і відтворення регулярної поризованої структури тіла заготовок виробів (130-220 °С, витримка 20 хв.), перенесення нелипких заготовок із футерованої форми на термостійкий піддон з подальшим нагріванням до 500-550 °С і їх витримкою (для надання їм задовільної водо- і паростійкості), охолодження й одержання готових виробів.

Одержані емпіричні відомості поведінки досліджуваних композицій дають відповідь про число способів і видів їх застосувань; стадійність, послідовність, температурні інтервали, режими і тривалість їх оброблення; з'ясовують вимоги до систем вимірювання і управління теплового зонованого перероблення, до вибору оснащення і футерування його поверхонь.

Результати та їх обговорення

Оптимізована рецептура приготування сирцевої суміші дозволяє перероблення композицій різними способами з формуванням термоізоляційних матеріалів широкого призначення: гранульованих теплоізоляційних наповнювачів (рис. 3), матеріалів для термоізолювання у складних за формою конструкціях (рис. 4), плитного і оболонкоподібного видів термоізоляційних матеріалів (рис. 5). Така поставлена задача в залежності від цілей і особливостей вирішуваних завдань досягається можливістю проведення декількома відмінними способами завершальних стадій їх отримання. Використання двох стадійної схеми запропонованого перероблення в технології приготування поризованих теплоізоляційних матеріалів зумовлюють:

1) характер і особливості поведінки складових компонентів рідко-скляних композиційних систем у ході термооброблення, виявлення ними сильної ад-

гезії по відношенню до більшості конструкційних матеріалів;

2) необхідність розв'язання питання легкого видалення заготовок із оснастки формування;

3) вибір способу футерування внутрішніх поверхонь розбірних форм оснащення;

4) термофізичні і хімічні властивості використаного матеріалу футеровки.

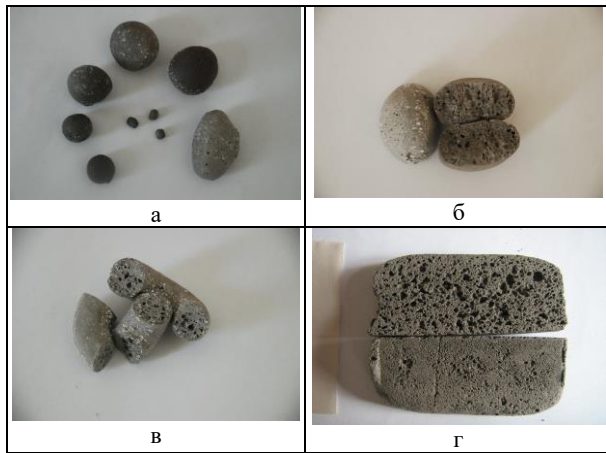


Рис. 3. Зображення зразків виробів гранульованих теплоізолюючих наповнювачів, одержаних у футерованих формах без обмеження об'єму формування:

- а, б – нарізанням ізорозмірних елементів;
в – висічкою елементів із пластичного затверділого сирцевого коржа заданої сформованої товщини;
г – із заготовок, сформованих в окремих розбірних формах



Рис. 4. Зображення фрагментів ділянок зон теплоізолювання у складних за формою конструкціях, проведених з заповненням робочої зони фрагментованими елементами і наступним термообробленням у розбірному оснащенні різної складності:

- а – без обмеження вільного об'єму формування;
б – з обмеженням простору формування

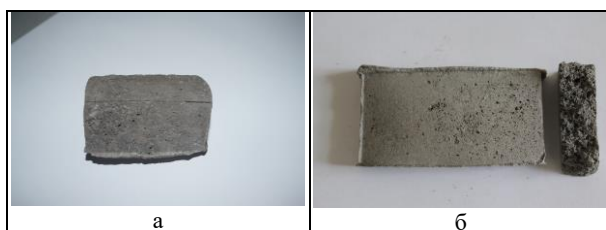


Рис. 5. Зображення фрагментів виробів, сформованих:
а – в оболонкоподібному виді;
б – у плитному виді

Особливістю технічного рішення є:

– легкість і доступність одержання складових і приготування сировинної суміші;

– формування сирцевої маси безпосередньо при «затворенні» її рідким склом за звичайних умов;

– спосіб термоізолювання є швидким;

– можливість легкого формування і фрагментування сирцевих заготовок, притаманних їм властивостей дає можливість рознести у часі і просторі окремі стадії проведення теплової ізоляції: стадії підготовки, формування грануляту (можливо, на спеціалізованій дільниці); зберігання; транспортування; технологічного укладання у робочій зоні з вимогами підвищеного опору теплопередачі (можливо, на будівельному майданчику);

– оброблення складних робочих ділянок – підбором товщини коржа сирцевого масиву, розмірів й форми вихідних фрагментованих елементів (залежно від цільового завдання та для можливості більш щільного їх упакування);

– універсальність способу термоізолювання (основується на прояві значної адгезійної здатності лужно-силікатних композиційних систем по відношенню до більшості конструкційних матеріалів – металів, кераміки, скла, дерева);

– мала усадка при запропонованій рецептурі сировинної суміші і способу оброблення;

– індиферентність до більшості складових компонентів і стабільність характеристик теплоізоляційного матеріалу, високі тепло- і хімічна стійкість, негорючість, здатність витримувати значні температури;

– поєднання набору цінних властивостей: низького коефіцієнта теплопровідності, термостійкості, негорючості, довговічності, невисокої собівартості.

Практична реалізація виробництва лужно-силікатних поризованих теплоізоляційних виробів у виробничих масштабах. Вимоги до роботи й функціонування адаптивних систем керування термодоброблення сирцевої маси

Відтворення досліджуваних теплоізоляційних матеріалів за розробленими рецептурою й технологічним регламентом у масових виробничих масштабах з набором цільових характеристик у великій мірі залежить від якісної і надійної роботи засобів формування теплового поля у зонах перероблення сирцевої маси і правильного вибору і ефективної роботи системи автоматизованого управління теплообміном у нагрівальному обладнанні (електричного опору чи газовому).

Виявлені особливості термодоброблення сирцевої маси – процеси складні, послідовні, у різних температурних інтервалах, потребують нагрівання з різним темпом (в залежності від складу, рецептури, маси, конструкційних особливостей), зі зміною фазового стану, поведінки і теплоємності проміжних форм, необхідною витримкою; потребують розбиття на стадії для можливості заміни характеристик матеріалу поверхні футеровки технологічного оснащення.

Для можливості практичного відтворення теплових регламентних умов підготовчих стадій і проведення термічної поризації високомодульних силікатних предформ різних варіантів теплоізоляційних

прикладних рішень пропонується вибрати вимірювач – ПІД-регулятор багатофункціональний двока-

нальний ОВЕН ТРМ212 (Інструкція з експлуатації АРАВ.421210.001-05ІЕ [16], табл. 2, табл. 3).

Таблиця 2 – Характеристики ПІД-регулятора ОВЕН ТРМ212

Найменування	Значення
Час опитування входу	Не більше 1 с
Тип інтерфейсу	RS-485
Швидкість передачі	2,4;4,8;9,6;14,4;19,6;28,8;38,4;57,6;115,2 кбіт/с
Тип кабелю	Екранована кручена пара
Тип протоколу передачі	ОВЕН, Modbus RTU (Slave), Modbus ASCII (Slave)

Таблиця 3 – Датчики та вхідні сигнали

Датчик або вхідний сигнал	Діапазон вимірювання	Значення одиниці молодшого розряду	Межа основної наведеної похибки
ТП с НСХ по ДСТУ EN60584-1			
ТХА (К)	-200...+1300°C	0,1°C	±0,5%

Пристрій призначений для вимірювання та автоматичного (а також ручного та дистанційного режимів) регулювання температури (при використанні як датчиків ТП), а також інших фізичних параметрів, значення яких може бути перетворене датчиками на уніфікований сигнал постійного струму або напруги.

Інформація про будь-який із вимірних фізичних параметрів відображається у цифровому вигляді на вбудованому чотирьохрозрядному ЦІ.

Пристрій дозволяє виконувати такі функції:

- вимірювання температури та інших фізичних величин (тиску, вологості, витрати, рівня тощо) у двох різних точках за допомогою датчиків;
- обробку вхідних сигналів: – цифрову фільтрацію та корекцію;
- масштабування уніфікованого сигналу для відображення на ЦІ фізичної величини;
- обчислення та індикацію квадратного кореня з вимірюваної величини;
- обчислення різниці, суми, відносини кореня з різниці двох вимірюваних величин.
- ПІД регулювання виміряної або обчисленої величини в системі із запірно-регулюючим або триходовим клапаном в автоматичному, ручному та дистанційному режимах;
- корекцію уставки регулятора залежно від зовнішнього параметра;
- автоналаштування ПІД-регулятора на об'єкті;
- дистанційне керування процесом регулювання (запуск/зупинка);
- реєстрацію даних на ПК та конфігурування приладу з комп'ютера через інтерфейс RS-485.

ТП до приладу слід підключати за допомогою спеціальних компенсаційних (термоелектродних) проводів, виготовлених з тих самих матеріалів, що і ТП (рис. 6).

Допускається використовувати дроти з металів з термоелектричними характеристиками, які в діапазоні температур від 0 до 100°C аналогічні характеристикам матеріалів електродів ТП. З'єднуючи компенсаційні дроти з ТП і приладом слід дотримувати

тись полярності. У разі порушень зазначених умов можуть виникати значні похибки при вимірюванні.

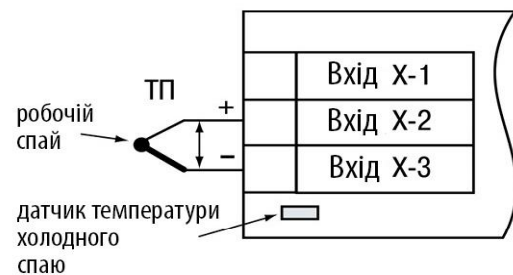


Рис. 6. Схема підключення термопари

Підключення за інтерфейсом RS-485. Інтерфейс зв'язку призначений для включення приладу до мережі, організованої за стандартом RS-485. Використання приладу в мережі RS-485 дозволяє:

- збирати дані про вимірювані величини та хід регулювання в системі диспетчеризації;
- встановити параметри приладу та дистанційно керувати за допомогою програми "Конфігуратор ТРМ101 ТРМ2хх".

Усі прилади в мережі з'єднуються у послідовну шину. Для якісної роботи приймачів та запобігання впливу завад на кінцях лінії зв'язку повинен бути узгоджувач резистор з опором 120 Ом. Резистор слід підключати безпосередньо до клем приладу.

Підключення приладу до ПК здійснюється через адаптер інтерфейсу RS-485.

Підключення навантаження до ОП типу С (рис. 7, 8). Ланцюги дискретних та аналогових вихідних елементів гальванічно ізолювані від схеми приладу. Оптосимістор включається до ланцюга керування силового симістора через обмежувач резистор R1. Значення опору резистора визначає величина струму управління симістора. Оптосимістор може також керувати парою зустрічно-паралельно включених тиристорів VS1 та VS2. Для запобігання пробією тиристорів через високовольтні стрибки напруги в мережі до їх виводів рекомендується підключати RC-ланцюжок, що фільтрує (R2C1).

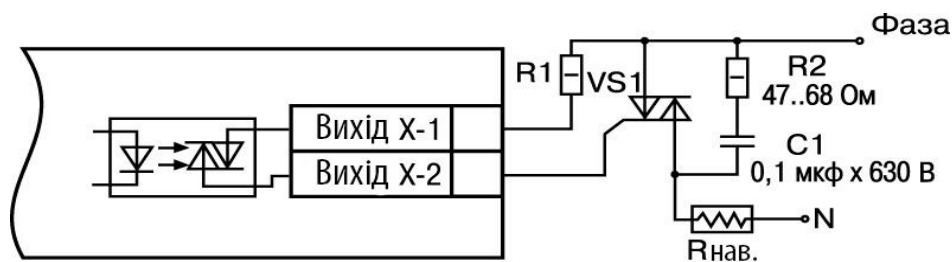


Рис. 7. Схема підключення силового симістора до ОП типу С

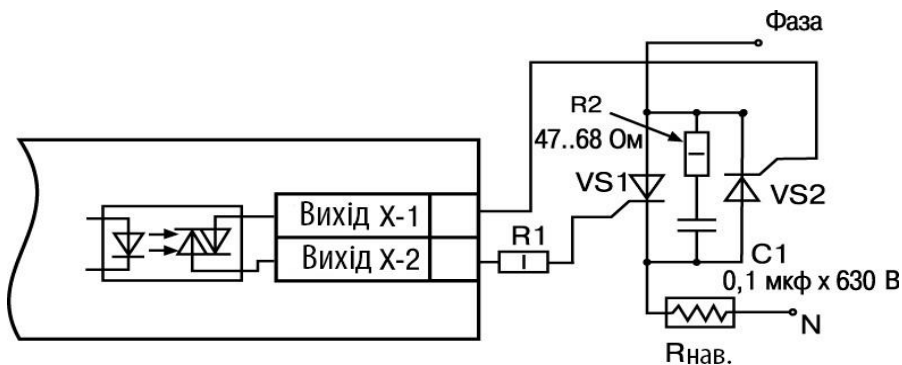


Рис. 8. Схема зустрічно-паралельного підключення двох тиристорів до ОП типу С

Висновки

Дане комплексне дослідження спрямоване на розроблення і реалізацію адаптивної системи зонованого управління режимами термооброблення кремній-вмісних високомодульних сирцевих композицій за умовами необхідними для відтворення якісних водостійких теплоізоляційних виробів із жорсткою поризованою структурою на основі розчинного скла та мінеральних наповнювачів техногенного походження (відходів вугле-енергетичного

комплексу). Запропонований проект відрізняється від відомих рішень складом, рецептурою вихідної сировинної суміші, послідовністю й режимами, стадійністю формування цільового продукту; технологічним оснащенням; розробленими і застосованими засобами керування виробництвом виробів; апаратними і програмними рішеннями їх управління; застосуванням отриманих достовірних знань про сумісну поведінку складових компонентів і дію впливаючих факторів в умовах технологічного перероблення.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Рыжков И.В. Физико-химические основы формирования свойств смеси с жидким стеклом / И.В. Рыжков, В.С. Толстой. – Харьков: Вища школа, 1975. – 139 с.
2. Фиговский О.Л. Жидкое стекло и водные растворы силикатов, как перспективная основа технологических процессов получения новых наноконпозиционных материалов / О.Л. Фиговский, П.Г. Кудрявцев // Электронный научный журнал: Инженерный вестник. – 2014. – Т. 29. – № 2. – С. 55 – 97.
3. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials // J. Scientific Israel-Technological Advantages. 2012. Vol. 14. № 1. P. 7–12.
4. Патент 4124471 (США) Регулювання розміру частинок золю кремнезему / Лайб Д.Ф. Заявл. 22.08.77, опубл. 7.11.78 МКІ В 01 D 13/02.
5. Леонович С.Н. Особенности получения щелочно-силикатных теплоизоляционных материалов / С.Н. Леонович, Г.Л. Щукин, А.Л. Беланович и др. // Наука и техника. – 2012. – № 6. – С. 45 – 50
6. Fei SHI, Lijiu WANG, Jingxiao LIU, Miao ZENG. Effect of heat treatment on silica aerogels prepared via ambient drying // J. Mater. Sci. Technol. – 2007. – Vol.23. – No.3 – P. 402 – 406 (in Chinese).
7. Малявский Н.И. Аэрокстекло – новый щелочно-силикатный пеноматериал / Н.И. Малявский, Б.В. Покидько, Л.И. Шумаков // Кровельные и изоляционные материалы. – 2007. – № 1. – С. 28 – 30.
8. Малявский Н.И., Зверева В.В. Кальций–силикатные отвердители жидкого стекла для получения водостойких щелочно-силикатных утеплителей ISSN 1994-0351. Инженерный вестник. 2015. Вып. 2 (38).
9. Figovsky O., Beilin D. Improvement of Strength and Chemical Resistance of Silicate Polymer Concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials. 2009, vol. 3, no. 2, pp. 97–101. doi: 10.4334/IJCSM.2009.3.2.097.
10. Figovsky O., Borisov Yu., Beilin D. Nanostructured Binder for Acid-Resisting Building Materials // J. Scientific Israel-Technological Advantages. 2012. Vol. 14. № 1. P. 7–12.
11. Kudryavtsev P.G. Alkoxides of chemical elements - promising class of chemical compounds which are raw materials for Hi-Tech industries; Journal "Scientific Israel - Technological Advantages", Vol.16, N2, 2014, p.147-170
12. Kudryavtsev P.G., Pilipenko V.G. Application of sol-gel processes for producing ultra-light weight composite materials, 6ht International Workshop on glass and ceramics from gels, Spain, 1991.
13. Kudryavtsev P.G., Kavalerova O.B., Kazakova I.L., Volkhin V.V., Koltakov A.I. Preparation and stabilization of colloidal solutions of metal oxides, 6ht International Workshop on glass and ceramics from gels, Spain, 1991.

14. Пат. 43549 Україна. МПК G 05 D 23/00. Спосіб програмного формування лінійного закону зміни температури нагрівника / О.Г. Дрючко, Д.О. Стороженко, Н.В. Бунякіна, І.О. Іваницька – у 2009 01783; Заявлено 02.03.2009; Опубл. 25.08.2009, Бюл. №16. – 10 с.
15. ITS-90 Table for Type K Thermocouple (Ref Junction 0°C) <http://reotemp.com>
16. Вимірювач – ПІД-регулятор багатофункціональний двоканальний ОВЕН ТРМ212. // Інструкція з експлуатації АРАВ.421210.001-05ІЕ.
17. Б. Р. Боряк, О. Г. Дрючко, Д. О. Ненич, О. В. Сухоребрий Автоматизована система лінійної регуляції керованої величини з використанням ПІД-регулятора. - 2023. - № 4. – С. 49-51. - <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.4.049>

Received (Надійшла) 28.02.2025

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.04.2025

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

- Дрючко Олександр Григорович** – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Oleksandr Dryuchko - Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Y. Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;
e-mail – itm.dryuchko@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2157-0526>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=6504199218>.
- Шефер Олександр Віталійович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Oleksandr Shefer - Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;
e-mail – itm.ovshefer@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-3415-349X>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57210203269>.
- Кислиця Світлана Григорівна** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Svetlana Kyslytsia - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;
e-mail – itm.skyslytsia@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-2431-9900>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57671474500>.
- Галай Василь Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Vasyl Halai - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;
e-mail – itm.galayvm@nupp.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0002-1205-7923>;
Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57221716022>.
- Сухоребрий Олександр Володимирович** – магістр кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій, Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна;
Oleksandr Suhorebryi - Master of Science, Department of Automation, Electronics and Telecommunications, Yuriy Kondratyuk Poltava Polytechnic National University, Poltava, Ukraine;
e-mail – ssanyok268@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0007-6847-1334>.

Development of adaptive systems for controlling thermal porization of alkali-silicate thermal insulation products and clarification of the features of its reproduction modes

O. Dryuchko, O. Shefer, S. Kyslytsia, V. Galai, O. Sukhorebryi

Abstract. The proposed research is aimed at developing and implementing an adaptive system for zoned control of heat treatment modes of the initial silicon-containing high-modulus raw mass and clarifying the conditions for reproducing high-quality waterproof thermal insulation products with a rigid porous structure based on soluble glass and mineral fillers of technogenic origin (waste of the coal-energy complex). The innovativeness and relevance of the proposed technical solutions are based on the properties revealed by the authors, which are manifested by the compositions; operational features and efficiency of this type of inorganic insulation with a low value of relative density, thermal conductivity capable of maintaining sufficient structural strength; easy controllability of the foaming and hardening processes within a wide range of composition compositions. The proposed variant of the type of control, the reproduction of the conditions of technological transformation, its modes (sequence, duration, stages, temperature limits, intensity and speed) determine the peculiarities of the behavior of the processed alkali-silicate composite systems. This variant differs from the known solutions in the composition, recipe of the initial raw material mixture, sequence and modes, stages of formation of the target product, technological equipment, developed and applied means of controlling the production of products, hardware and software solutions for their management. The work performed consists of three interconnected search empirical stages, based on the practical implementation of the sequential methodology and results of obtaining target samples according to the developed thermal production regulations using the proposed complex of hardware and software. The metrological quality of the obtained results and their reliability at the stage of clarification and identification of functional properties and dependencies valuable for production were ensured by the use of programmable precision thermal control systems of our own design; on a production scale – by selecting appropriate serial means.

Keywords: adaptive control systems, alkali-silicate composite materials, thermal porization, thermophysical properties, reproduction of regulatory conditions, metrological quality assurance.