

УДК 614.841:536.46

<https://doi.org/10.31474/1999-981X-2024-2-92-105>

Н.М. Козяр
О.В. Кириченко
В.А. Ващенко
Є.В. Школяр
М.А. Куценко
М.Г. Томенко
С.В. Гончар
С.О. Колінько

ЗАКОНОМІРНОСТІ ПРОЦЕСУ ГОРІННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВОГО ПАЛЬНОГО У ПРОДУКТАХ РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ

Мета. є аналіз та встановлення закономірностей процесу горіння частинок магнію у активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок вказаних речовин для визначення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Методи. Сучасні методи фізико-хімічного аналізу: термопарні методи вимірювання температури (використовувались вольфрам-ренієві термопари); безконтактні методи фіксування початку та кінця горіння частинок металів (температурні індикатори, фоточутливі елементи тощо); методи кінозйомки (кінокамера "Конвас-автомат" (швидкість зйомки 30 кадр/с)) та методи мікрозйомки кінокамера СКС-1М (швидкість зйомки 3000...5000 кадр/с)) процесу горіння окремих металевих частинок; методи рентгеноструктурного та мікрорентгеноспектрального аналізу (МРСА) для проведення хімічного аналізу.

Результати. Систематизовано та узагальнено дані по горінню частинок магнію у активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів, органічних та неорганічних речовин. Встановлено, що процес горіння частинок магнію є дуже складним, протікає по дифузійному механізмі та залежить від великої кількості різних чинників та встановлено, що процес горіння магнієвих стрічок у суміші кисню з інертними газами протікає у восьми областях з характерними особливостями полум'я, які залежать від концентрації кисню у навколишньому середовищі та зовнішнього тиску. Встановлено, що частинки магнію згорають у кисневмісних середовищах у дифузійному режимі з утворенням яркої зони свічення, радіус якої збільшується зі зростанням концентрації кисню та зовнішнього тиску.

Наукова новизна. Вперше встановлено закономірності процесу горіння частинок магнію у активних газоподібних продуктах (O_2 , $O_2 + N_2$, повітря, CO_2 , пара води та ін.) термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (O_2 , $O_2 + N_2$, повітря, CO_2 , пара води та ін.) та добавок органічних речовин (парафіну, стеарину, ідиолу, тіоколу та ін.) та неорганічних речовин (фторидів та оксидів металів та ін.) для визначення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Практична значимість. Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які отримані в вигляді математичних моделей та бази експериментальних даних по впливу технологічних параметрів зарядів сумішей на критичні режими вибухонебезпечного розвитку процесу їх горіння в умовах зовнішніх термічних впливів (підвищені температури нагріву, зовнішні тиски тощо) дозволяють на стадії виготовлення виробів шляхом оптимізації технологічних параметрів (співвідношення компонентів, дисперсності металевого пального та його природи) збільшувати температуру їх займання та знизити вірогідність пожежовибухонебезпечних руйнувань виробів в умовах їх зберігання та транспортування з врахуванням впливу зовнішніх термічних дій; в умовах запуску виробів шляхом оптимізації швидкостей і кутів під якими вони вистрілюються при їх застосуванні знижувати температуру нагріву металевих оболонок зарядів сумішей та зменшувати кількість передчасних вибухонебезпечних руйнувань виробів під час пострілу і польоту.

Ключові слова: піротехнічні багатокомпонентні нітратно-металізовані суміші, пожежна безпека, металеві пальні, процеси горіння.

Вступ.

З кожним роком в Україні та у всьому світі зростає число пожеж та вибухів в умовах зберігання, транспортування та застосування загальнопромислових піротехнічних виробів на основі ущільнених сумішей з порошків металевих палив (магнію, алюмінію та ін.),

нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів та ін.), добавок органічних (парафіну, стеарину, ідиолу та ін.) та неорганічних (фторидів металів та ін.) речовин, які спричиняють руйнування об'єктів, призводять до людських жертв та

наносять значні матеріальні збитки [1 – 6].

Аналіз зазначених випадків показує, що загорянню та подальшому пожежонебезпечному руйнуванню виробів, як правило, передують зовнішні термічні дії, яким вони піддаються (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, в умовах їх транспортування при займанні близько розташованих об'єктів, а також під час пострілу та польоту виробів в умовах їх запуску тощо). Це призводить, у першу чергу, до передчасного займання та розвитку горіння зарядів сумішей, що входять до складу виробів, та подальших пожежонебезпечних руйнувань виробів. Тому суттєвого практичного значення набуває попередження вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів у разі впливу зовнішніх термічних дій.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Для розробки методів попередження необхідно мати результати експериментальних досліджень, у першу чергу, дані по розвитку процесу горіння частинок металевих пальних у активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок вказаних речовин в умовах зовнішніх термічних дій. На даний момент вказані дані містяться у окремих монографіях, наукових статтях та публікаціях [7 – 15], при цьому їх систематизація та узагальнення відсутні, що утруднює теоретичний аналіз процесу розвитку горіння зарядів сумішей при різних зовнішніх умовах, включаючи підвищені температури нагріву, зовнішні тиски, склад навколишнього середовища та ін.

Аналіз існуючих досліджень поведінки компонентів розглядуваних сумішей в умовах підвищених температур нагріву [16, 17] показує, що основними активними окиснювальними продуктами їх розкладання є O_2 , $O_2 + N_2$, CO , CO_2 , пара H_2O та ін. Крім цього, встановлено, що основним активним газоподібним продуктом розкладання сумішей є O_2 , а решта активних газоподібних продуктів розкладання сумішей при температурах, притаманних к-фазі сумішей в умовах горіння (1000...1300 K) [1, 3], складають соті частки. Тому нижче розглядаються результати досліджень процесу горіння частинок магнію у вказаних газоподібних продуктах, включаючи повітря, основою якого є суміш $O_2 + N_2$.

Мета статті (постановка завдання)

Аналіз та встановлення закономірностей процесу горіння частинок магнію у активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок вказаних речовин для визначення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Методи дослідження

Усі дослідження проводились з порошками магнію, що випускаються піротехнічною промисловістю, на стандартному піротехнічному обладнанні та з використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу: методів кінозйомки та мікрокінозйомки, контактних та безконтактних методів вимірювання температури, методів рентгеноструктурного аналізу та ін. Відносна похибка вимірювання часу згоряння частинок металевих пальних у окиснювальних газоподібних середовищах (τ , с) не перевищувала 4...6 %.

Виклад основного матеріалу

Магній відноситься до металів із високою пружністю пари, при цьому характер горіння частинок магнію є парофазним. Наявність парофазного полум'я спостерігається й при горінні магнієвих стрічок у окислювальних середовищах — суміші кисню з аргонем та суміші кисню з вуглекислим газом.

Горіння стрічок магнію у повітрі і сумішах кисню з інертними газами. Під час спалювання магнієвих стрічок у суміші кисню з аргонем виявлені 8 областей з характерними особливостями полум'я, які залежать від загального тиску і концентрації кисню в газовій суміші (рис. 1).

1 область. Дуже сильне дифузійне полум'я зеленого кольору при низьких (до $1,013 \cdot 10^5$ Па) тисках, яке нагадує вибух. У міру підвищення тиску поступово переходить від режиму, для якого характерне сильне розбрикування металу у вигляді великих частинок, оточених зеленим полум'ям, до режиму швидкісного горіння світлим полум'ям.

Продукти згоряння Mg в цій області схожі на тонко розпилений метал темного кольору.

2 область. Полум'я дуже яскраве, з тонким димом. Продукти згоряння являють собою маленькі частинки скловидної напівпрозорої речовини рожевого кольору. Тут же виявлені великі напівпрозорі несферичні пустотілі оболонки з гладкою внутрішньою і

шорсткуватою зовнішньою поверхнею. Деякі з оболонок діаметром 2...3 мм мають товщину стінок 0,05 мм. З підвищенням тиску розмір оболонок збільшується, а товщина стінок – зменшується.

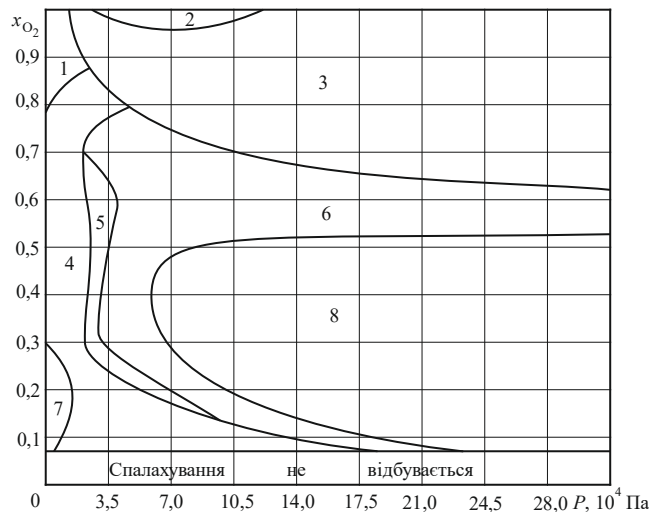


Рис. 1. Режими горіння магнієвої стрічки в суміші кисню й аргону, які спостерігаються (x_{O_2} – мольна частка кисню).

3 область. Яскраве полум'яне горіння. Поблизу полум'я спостерігались краплі розміром меншим 50 мкм. Продукти згоряння – волокно з рожевої скловидної твердої речовини.

4 і 5 області. Для цих областей характерне дуже яскраве біле полум'я. В четвертій області конденсований осадок є твердим, білим за кольором, з “мереживною” структурою, і яка не має схожості з вихідною стрічкою. В п'ятій області осадок менш “мереживний” і являє собою крейдоподібну білу нитку, подібну за формою вихідній стрічці. Ця нитка відразу після закінчення горіння світиться жовтим кольором. У п'ятій області полум'я було менш прозорим, ніж у четвертій.

6 область. У цій області полум'я менш яскраве, ніж поверхня стрічки. Продукт згоряння являє собою білу оболонку, яка оточує, але практично не торкається крейдоподібної стрічки (точна копія вихідного зразка).

7 область. Область низького тиску і малої (< 0,3) концентрації кисню. Під час спалахування стрічка розривається і горить у вертикальному положенні. Полум'я має тонку

яскраву зону зеленого кольору. Під час горіння утворюється велика кількість щільного диму із крупних частинок. Продукт згоряння являє собою пустотілу оболонку, яка відтворює контури стрічки (стрічка протягом приблизно половини часу горить тільки з нижнього кінця, оскільки на її поверхні відкладається оксид магнію).

8 область. Продукти згоряння у вигляді пустотілої трубки сірого кольору з білим нальотом повністю оточують магнієву стрічку. З утворенням трубки реакція припиняється (ще до повного згоряння стрічки). Речовина трубки, поряд з MgO, містить велику кількість магнію, який не згорів. Реакція скоріше нагадує корозію, ніж горіння.

Горіння частинок Mg у кисневмісних середовищах. Встановлено, що частинки Mg у різних середовищах, які містять кисень (наприклад, чистий O_2 , суміш $O_2 + N_2$ або повітря), згоряють у дифузійному режимі з утворенням навколо них зони свічення радіусом r_c . При цьому, сталість

інтенсивності випромінювання зони свічення та її геометричних розмірів свідчить про сталість режиму горіння частинки. Радіус зони свічення залежить від концентрації кисню; із збільшенням концентрації кисню відношення радіуса зони свічення до початкового радіуса частинки $\frac{r_c}{r_0}$ зростає (рис. 2).

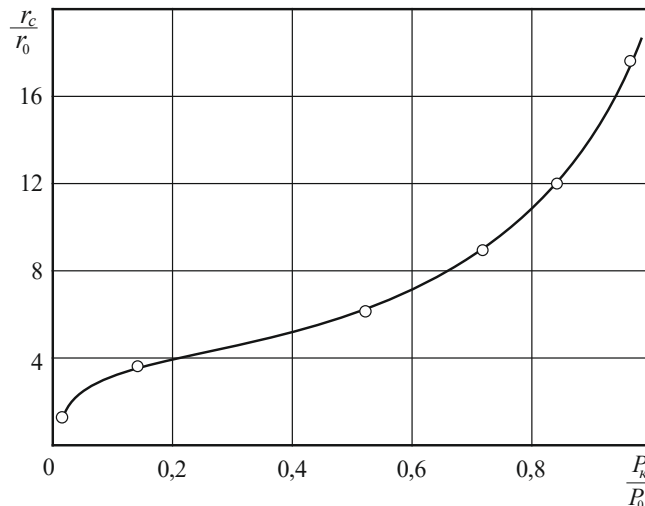


Рис. 2. Залежність відношення радіуса зони свічення до початкового радіуса частинки від концентрації кисню в суміші аргон – кисень при атмосферному тиску; ○ – експериментальні дані.

Процес горіння частинки магнію закінчується нестационарним, за тривалістю значно більш коротким процесом загасання. Він характеризується зменшенням радіуса зони свічення до розміру окисної оболонки. При цьому в зоні свічення виникають неоднорідності у вигляді легко помітних окремих цівок парів магнію, які горять.

На поверхні частинки збільшується кількість осередків горіння (ділянок із підвищеною інтенсивністю свічення). Відбувається зміна геометричної форми і зменшення розмірів окисної оболонки, обумовлене, очевидно, її плавленням. Частинка магнію, що утворюється, деякий час після закінчення горіння має досить велике світлове випромінювання.

Відношення середнього радіуса окисної оболонки, яка утворюється, до радіуса вихідної частинки в середньому звичайно дорівнює 0,75. Але при односторонньому підпалюванні частинки і несиметричному горінні це відношення складає 1,25.

Середнє значення $\frac{r_c}{r_0}$ при горінні Mg у повітрі при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па складає 4,15 (змінюється в межах 3,6...4,7). З підвищенням змісту кисню інтенсивність випромінювання поверхні частинки росте і при парціальному тиску кисню $0,5 \cdot 10^5$ Па стає порівняною з випромінюванням зони свічення.

При високих концентраціях кисню в суміші можливе розщеплення частинки, яка горить, на декілька частин (звичайно 3 – 4).

Залежно від вибору ознак, які визначають процес горіння частинки, час горіння можна оцінити принаймні трьома способами.

За першим способом, який широко застосовується при оцінці часу горіння на трекових установках, основною ознакою, що визначає наявність процесу горіння, є світлове випромінювання частки – довжина світлого треку.

У цьому випадку “видимий” час горіння частинки визначиться як

$$\tau_1 = \tau_3 + \tau_{c2} + \tau_{nc} + \tau_{cb}, \quad (1)$$

де τ_3 – час займання; τ_{c2} – час стаціонарного горіння; τ_{nc} – час нестационарного горіння; τ_{cb} – час світіння частки оксиду магнію після закінчення процесу горіння.

За другим способом основною ознакою процесу горіння є існування реакційної зони навколо частинки, що супроводжується тепловиділенням. Час горіння визначається сумою

$$\tau_2 = \tau_3 + \tau_{с2} + \tau_{н2}, \quad (2)$$

Час τ_2 з достатньою точністю може бути вимірний малоінерційними термопарами. З порівняння τ_1 та τ_2 випливає, що час горіння, вимірний на трекових установках, повинен завжди перевищувати час, вимірюваний малоінерційною термопарою (за винятком випадків, коли кінцеві продукти реакції є газоподібними).

За третім способом визначають “ефективний” час горіння, який визначається з умови повного теплообміну частинки і продуктів її горіння з навколишнім середовищем. Цей час більший сумарного часу спалахування і горіння частинки.

Паралельним вимірюванням часу горіння одиночних частинок у нерухомому повітрі за допомогою фоторегістру, фотоелементу, малоінерційної мікротермопарі і швидкісної кінозйомки було встановлено, що час стаціонарного горіння частинок Mg діаметром 200 мкм при $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па складає 0,85...0,9 від часу існування світлового випромінювання. Процес нестационарного горіння і світіння складає 0,15...0,1 часу існування світлового випромінювання.

У табл. 1 наведені значення часу горіння частинок магнію, виміряні різноманітними методами (τ_{ϕ} – час горіння по треку, знятому фоторегістром; $\tau_{\phi,ел}$ – час горіння,

вимірюваний фотоелементом; τ_2 – час горіння, вимірюваний малоінерційною мікротермопарою; τ_n , $\tau_{ш.к}$ – час горіння частинки в паровій фазі та загальний час свічення, визначені по кадрах швидкісної кінозйомки).

З підвищенням температури окисного середовища кількість тепла, що віддається частинкою, зменшується, і час свічення після закінчення горіння збільшується.

Залежність часу горіння в повітрі від початкового діаметра частинок Mg при симетричному і несиметричному горінні (тиск – атмосферний):

$$\tau_2 = 1,0 \cdot \delta_0^2 \quad \text{– при симетричному горінні; (3)}$$

$$\tau_2 = 2,7 \cdot \delta_0^2 \quad \text{– при несиметричному горінні. (4)}$$

При горінні частинок магнію в суміші кисень – аргон для часу несиметричного горіння отримана емпірична формула:

$$\tau_2 = \frac{0,56 \cdot \delta_0^2}{\left(\frac{P_k}{P_0}\right)^{1,07}}, \quad (5)$$

де P_0 – загальний тиск суміші; P_k – парціальний тиск кисню; τ_2 (с); δ_0 (10^{-3} м). При симетричному горінні коефіцієнт k у законі $\tau_2 = k \cdot \delta_0^2$ змінюється обернено пропорційно відношенню $\frac{P_k}{P_0}$.

Таблиця 1 Час горіння частинок Mg, виміряний різноманітними методами

δ_0 , мкм	τ_n , с	$\tau_{ш.к}$, с	τ_{ϕ} , с	$\tau_{\phi,ел}$, с	τ_2 , с
620	0,39	0,42	0,41	0,39	0,39
520	0,28	0,38	0,30	0,26	0,28
460	0,26	0,35	0,26	0,25	0,20
420	0,19	0,23	0,21	0,19	0,17
400	0,16	0,21	0,18	0,17	0,15
270	0,07	0,13	0,08	0,08	0,07

Швидкісна кінозйомка горіння підвишених сферичних частинок Mg у нерухомому середовищі повітря та суміші кисню з аргонем показує, що після спалахування метал міститься в центрі сферичної, майже однорідної за структурою,

зони свічення, яка складається із сукупності великого числа світних цівок. Ці цівки утворюються, очевидно, при згоранні парів металу, які витікають через пори оксидної оболонки. Замість тонкого і чітко обкресленого фронту полум'я, характерного

для ламінарного горіння крапель однофракційних рідких вуглеводних палив у режимі молекулярної дифузії, зона свічення в даному випадку має розмиті (із зовнішнього боку) контури і значну товщину. Зрозуміло, що при такій структурі зони свічення визначення положення фронту горіння утруднене і певною мірою умовне. При цьому тривалий час після спалахування геометричні розміри зони свічення та частинки, яка розміщується в її центрі, не змінюються. Проте частинка до спалахування за формою сферична, у процесі горіння, як правило, приймає неправильну форму.

Досліди дозволили встановити й інші особливості процесу горіння магнію. Якщо побудувати залежність відносного часу горіння $\frac{\tau_2}{\tau_0}$ (константи k) від відносного розміру зони свічення (рис. 3), то легко встановити, що константа k сильно зменшується при зростанні концентрації кисню до 45 % (за об'ємом) і слабо змінюється при її подальшому підвищенні. Сильна залежність константи часу горіння від радіуса зони свічення вказує на те, що реакції, тепло яких визначає швидкість випаровування магнію, проходять у газовій фазі. При концентраціях кисню вищих 45 % константа часу горіння стає слабо залежною від розміру зони свічення, хоча вплив концентрації кисню на час горіння залишається сильним.

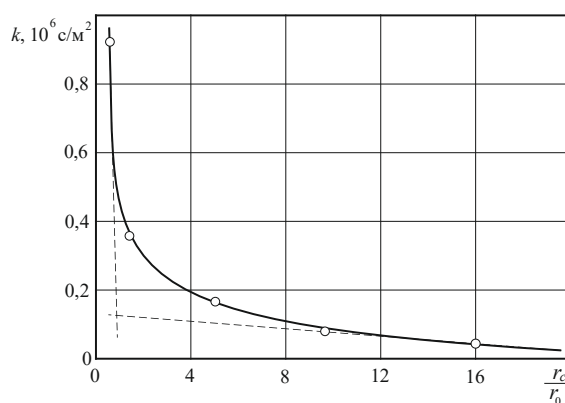


Рис. 3. Залежність константи часу горіння k частинок магнію від відношення $\frac{r_c}{r_0}$ при атмосферному тиску

Встановлене підвищення інтенсивності випромінювання оксидної

оболонки із збільшенням концентрації O_2 (вище 45 %) свідчить про те, що реакції, які визначають швидкість випаровування металу, проходять на поверхні оксидної оболонки або у її порах.

В оксидній оболонці, крім дрібних пор, міститься деяка кількість значних отворів. У силу цього поверхня дифузійного фронту горіння може бути перекручена цівками парів магнію, які витікають. Це призводить до того, що оточуюче частинку полум'я за своєю структурою починає нагадувати заворожений турбулентний потік. При цьому взаємодія парів магнію з киснем відбувається в умовах ускладненого ламінарного фронту і подібна процесу горіння заморожених турбулентних молів. Тут, як і при молекулярній дифузії, перенос тепла до краплі магнію, яка випаровується та знаходиться в пористій оксидній оболонці, відбувається шляхом теплопровідності.

При горінні частинок металів у полум'я піротехнічних складів, вони перебувають у потоці, що рухається, маючи заповнення за швидкістю відносно газу. Тому великий інтерес становлять експерименти з спалювання нерухомих магнієвих часток, що обдуваються газовим потоком із заданою швидкістю. Частинка Mg діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м або $4,75 \cdot 10^{-3}$ м, підвішена на молібденовій або вольфрамовій нитці, попередньо розігрівалася Бунзенівським пальником до температури плавлення, а потім піддавалася впливу газового потоку (суміш $O_2 + N_2$). Температура потоку складала 290...773 К, швидкість обдуву 2...10 м/с. Час горіння визначався за секундоміром та за допомогою фотоелемента. Встановлено (рис. 4 – 8), що із збільшенням швидкості обдування та вмісту кисню в суміші швидкість горіння зростає; при підвищенні температури потоку швидкість горіння зменшується.

Показано, що при парофазному горінні частинок Mg маса кінцевого продукту зменшилася, зі збільшенням вмісту кисню в середовищі. У повітрі вона складала біля 25 %, а при вмісті кисню 1 % приблизно дорівнювала масі вихідної речовини.

Розмір зразка, що згорав парофазним полум'ям у сумішах кисню з аргоном (1...21 % O_2) та азотом (4...21 % O_2), був меншим вихідного на 10 %. У суміші 1 % O_2 та 99 %

N_2 розмір продукту горіння був більшим вихідного у 1,5...1,7 разу. Полум'я навколо парофазного зразка, що горів, було тим густішим, ніж більше містилося кисню в середовищі. Відношення розміру зовнішньої межі зони свічення до розміру зразка дорівнює при 4 % O_2 приблизно 5, при 21 % – 10.

При парофазному горінні частина металу (від 15 % у повітрі і до 60 % при вмісті O_2 1 %) згорає (окисляється) в конденсованій фазі. В конгломераті, який горить, метал виявляється розміщеним у сферичну оболонку оксиду, формування якої починається в процесі передполум'яного окиснення та продовжується в процесі горіння. Пари металу проходять через пори в оболонках. Далі вони частково сорбуються оксидом та окисляються на його поверхні, частково виходять за межі конгломерату і згорають у газовому прошарку поблизу нього.

Час парофазного горіння зразків у повітрі виявився пропорційним середньому їх розміру в ступені, більший 2, не залежним від температури середовища (до 1023 K), але зі зростанням концентрації O_2 він зменшувався, особливо в області малих концентрацій.

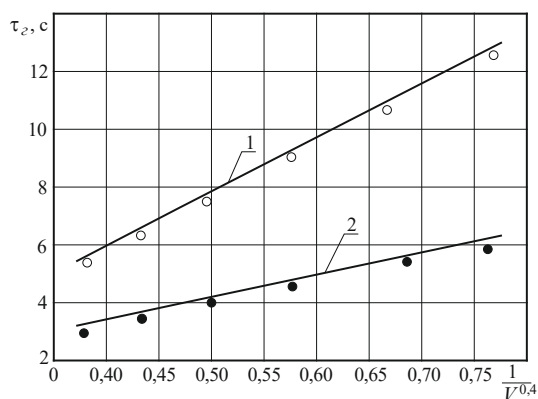


Рис. 4. Залежність τ_2 частинок Mg від швидкості потоку повітря, що витікає, при $T = 290$ K (V – у м/с): 1 – частинки діаметром $4,75 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – частинки діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м; \circ, \bullet – експериментальні дані.

У табл. 2 наведено значення часу горіння для конгломератів із середнім розміром $0,8 \cdot 10^{-3}$ м.

З табл. 2 видно, що при малому вмісті кисню (1 %) при збільшенні вмісту азоту час горіння збільшується. Це, мабуть, пов'язано з утворенням нітриду магнію, який гальмує

перенос реагентів всередині конгломерату.

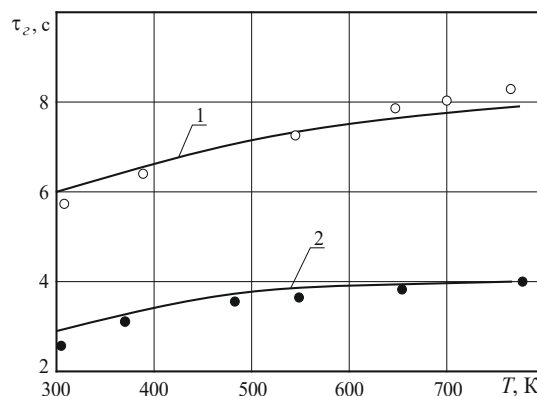


Рис. 5. Залежність τ_2 від температури потоку повітря ($V = 10$ м/с): 1 – частинки діаметром $4,75 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – частинки діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м; \circ, \bullet – експериментальні дані.

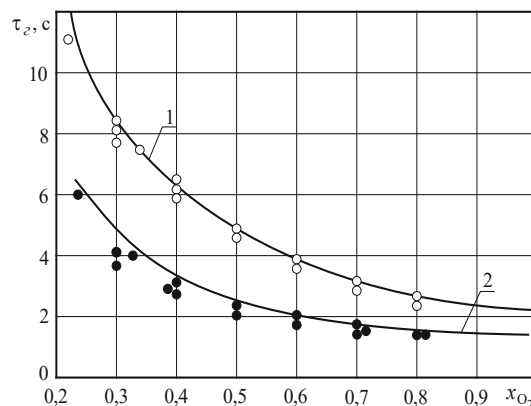


Рис. 6. Залежність τ_2 від вмісту O_2 в суміші $O_2 + N_2$ ($T = 290$ K, $V = 2$ м/с): 1 – частинки діаметром $4,75 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – частинки діаметром $3,15 \cdot 10^{-3}$ м; \circ, \bullet – експериментальні дані.

Горіння частинок магнію у водяній парі. При дослідженні горіння частинок магнію в суміші водяної пари з азотом навколо частинок спостерігалися парофазні промені. Розмір часток Mg складав 34...184 мкм. Горіння відбувалося в продуктах згорання газового пальника, який працює всередині бомби високого тиску на суміші водню, кисню та азоту. При цьому варіювався вміст водяних парів, тиск суміші і концентрація надлишкового водню.

Температура середовища значно перевищувала граничну температуру займання та дорівнювала 1273...2073 K.

Таблиця 2 Час горіння конгломератів Mg із середнім розміром $0,8 \cdot 10^{-3}$ м у різноманітних середовищах

Вміст компонента, %			τ_2 , с
O ₂	N ₂	Ar	
21	79	–	0,4
4	96	–	1,1
4	16	80	1,1
1	4	95	2,4
1	99	–	4,4

Якщо в середовищі був відсутній надлишковий водень, то треки були довгими, широкими – у 3 рази перевищували по ширині діаметр вихідної частинки і були чіткими. При додаванні водню треки ставали вузькими і короткими, причому навколо частинки, яка горить, утворювався широкий ореол свічення.

На рис. 7 показана залежність часу горіння часток із середнім діаметром 90 мкм (крива 1) та 55 мкм (крива 2) від тиску у середовищі 0,35 H₂O + 0,65 N₂ (концентрація – у мольних частках) та при температурі 1323...1423 К.

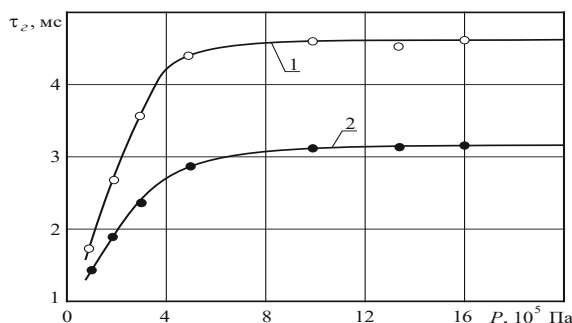


Рис. 7. Залежність часу горіння часток Mg від тиску при спалюванні у водяній парі (0,35 H₂O + 0,65 N₂): 1 – $\delta = 90$ мкм; 2 – $\delta = 55$ мкм; \circ , \bullet – експериментальні дані.

З рис. 7 випливає, що час горіння збільшується із зростанням тиску від $1,013 \cdot 10^5$ Па до $6,078 \cdot 10^5$ Па і при подальшому підвищенні тиску істотно не змінюється.

Це якісно узгоджується з висновками нестационарної дифузійної теорії Сполдінга; проте, наявність гомогенної і гетерогенної конденсації парів оксиду призводить до того, що час горіння (при атмосферному тиску) виявляється пропорційним не квадрату діаметра, а діаметру у степені $\approx 2,5$.

На рис. 8 показана залежність часу

горіння від діаметра частинок при тисках $11,143 \cdot 10^5$ Па, $6,078 \cdot 10^5$ Па та $1,013 \cdot 10^5$ Па в середовищі 35 % H₂O + 65 % N₂.

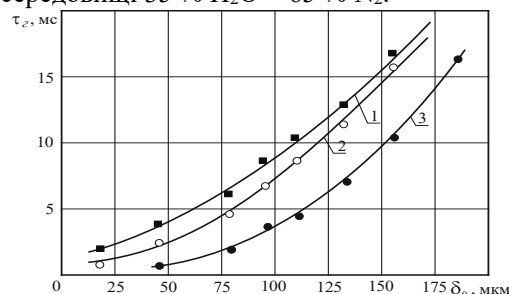


Рис. 8. Залежність часу горіння часток Mg від їх розміру частинки (суміш 35 % H₂O + 65 % N₂): 1 – $P = 11,143 \cdot 10^5$ Па; 2 – $P = 6,078 \cdot 10^5$ Па; 3 – $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па); \blacksquare , \circ , \bullet – експериментальні дані.

При тиску $P = 1,013 \cdot 10^5$ Па крива задовільно апроксимується залежністю:

$$\tau_2 = 2,0 \cdot 10^{-5} \cdot \delta_0^{2,6}, \quad (6)$$

а при тисках $6,078 \dots 11,143 \cdot 10^5$ Па залежність переходить у

$$\tau_2 = 4,8 \cdot 10^{-3} \cdot \delta_0^{1,6}, \quad (7)$$

$$\delta_0 \text{ (мкм)}, \tau_2 \text{ (мс)}.$$

Зміна характеру залежності в області тисків $1,013 \dots 6,078 \cdot 10^5$ Па $\tau_2 = f(\delta_0)$ свідчить про зміну механізму горіння.

Залежність часу горіння частинки Mg від концентрації водяної пари ($P = 1,013 \cdot 10^5$ Па, середній розмір частинки Mg 90 мкм) показана на рис. 9. При цьому варто врахувати, що при варіюванні вмісту H₂O одночасно підвищувалася температура середовища (з 1373 К до 2073 К).

При заміщенні азоту в суміші (35 % H₂O + 65 % N₂) воднем (при незмінному вмісті водяної пари) швидкість горіння Mg зростала (рис. 10).

При горінні частинки магнію, нерухомо підвішених на вольфрамовій нитці, у середовищі водяної пари з температурою 390 К від поверхні частинки

піднімалася хмара, яка містила пластівці MgO. Протягом горіння кількість пластівців у хмарі зростало. Відношення $\frac{r_c}{r_0}$ хмари перебувало в межах 2...2,2. Коли процес вигорання магнію закінчувався, відбувалося утворення твердого гіллястого “коралу” з пластівців, які кружляли у хмарі (пухких, різноманітних за формою та розміром шматочків). Центральна частина “коралу” порівняно з іншими його частинами якийсь час мала підвищене свічення.

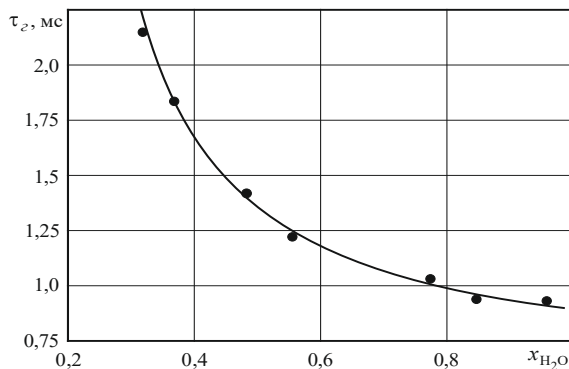


Рис. 9. Залежність часу горіння від мольної концентрації H_2O для частинок Mg діаметром 90 мкм; • – експериментальні дані.

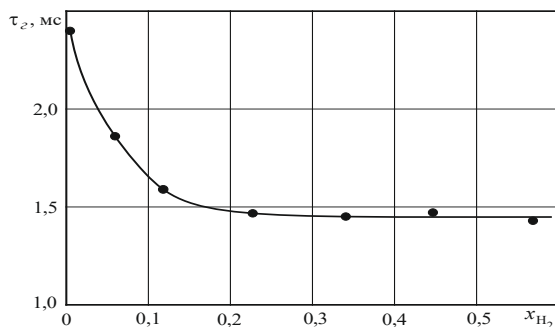


Рис. 10. Залежність часу горіння від мольної концентрації збиткового водню для частинок Mg діаметром 90 мкм; • – експериментальні дані.

Кружляння пластівців MgO свідчить про руйнацію оксидної плівки в процесі горіння. Істотну роль у цьому процесі відіграє водень, який виділяється при гетерогенному окислюванні частинки.

Залежність часу горіння від початкового діаметра частинки в парах води залишається квадратичною; при

симетричному горінні $\tau_2 = 0,7 \cdot \delta_0^2$, при несиметричному – $\tau_2 = 1,09 \cdot \delta_0^2$ (τ_2 , с; δ_0 , мм).

Таким чином, швидкість горіння в парах H_2O виявляється вищою, ніж у повітрі.

Слід зазначити, що підвищення швидкості горіння за рахунок присутності в оксидному середовищі водяних парів було встановлено не тільки при дослідженні горіння частинок Mg, але і при проведенні експериментів із магнієвими стрічками.

Горіння частинок магнію у вуглекислому газі. Трудність спалахування і підтримки стійкого горіння частинок магнію у середовищі, що містить CO_2 , може бути пояснене утворенням на їх поверхні стрічки карбиду магнію, що складає разом із Mg суміш із відношенням Піллінга-Бедворса, більшим одиниці.

Процес згорання частинок магнію у вуглекислому газі, як встановлено показаннями фотоелемента і швидкісною кінозйомкою, на відміну від горіння у повітрі та у суміші кисень-аргон, є нестационарним – спостерігаються пульсації світлового випромінювання зони горіння. Швидкість горіння частинок менша, ніж у кисні. У процесі горіння відбуваються періодичні прориви парів магнію крізь оксидну оболонку: згорання йде окремими смолоскипами. Оболонка темно-сірого кольору, що утворюється після згорання частинки, складається в основному із суміші окислу магнію і вуглецю. За даними рентгеноструктурного аналізу, продукти згорання Mg в CO_2 містять сліди Mg_2C_3 .

Емпіричні залежності $\tau_2 = f(\delta_0)$ при атмосферному тиску:

$$\tau_2 = 1,55 \cdot \delta_0^{2,2} \text{ – чистий } CO_2; \quad (8)$$

$$\tau_2 = 6,56 \cdot \delta_0^3 \text{ – } 50 \% CO_2 + 50 \% Ar; \quad (9)$$

$$\tau_2 = 13,2 \cdot \delta_0^{2,2} \text{ – } 25 \% CO_2 + 75 \% Ar; \quad (10)$$

$$\tau_2 \text{ (с), } \delta_0 \text{ (} 10^{-3} \text{ м)}$$

Порушення квадратичної залежності обумовлено, вірогідно, нестационарністю процесу горіння.

На характер горіння сильно впливає більша товща оксидної плівки, що утворюється у передзаймовий період, ніж при горінні у кисні. Оскільки теплота

реакції Mg з CO₂ менша, ніж з O₂, період затримки спалахування більший.

Крім цього, наявність конденсованих частинок вуглецю і відсутність карбиду сприяють зменшенню проникності оксидної оболонки.

Горіння конгломератів магнію в повітрі і сумішах кисню з інертними газами.
Дослідним шляхом отримано результати експериментів зі спалювання конгломератів

Mg, що складалися з частинок з середнім розміром 12 мкм і порозністю 0,5 в атмосфері, яка містить O₂, N₂ та Ar, при температурі середовища 863...1023 К.

Досліди показали, що зразок, введений в оксидне нагріте середовище, залежно від її температури, поведився різним чином (табл. 3).

Таблиця 3 Горіння конгломератів магнію

Ознаки процесу	Режими окислення		
	I	II	III
Поведінка зразка	Зразок залишався темним як завгодно довго (до 5 хв)	Зразок розжарювався до яскраво-червоного кольору	Зразок горів яскравим білим полум'ям
Характер окиснення	Повільне окиснення	Поверхнєве окиснення	Парофазне горіння
Розмір та маса залишків	Майже такі ж самі, як у вихідного зразка	Майже такі ж самі, як у вихідного зразка	Залишки або не містять металу, або (при малих концентраціях O ₂ 1...4 %) його мало

Висновки

Систематизація, аналіз та узагальнення даних по горінню частинок магнію у активних газоподібних продуктах (O₂, O₂ + N₂, повітря, CO₂, пара води та ін.) термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів), органічних (парафіну, стеарину, ідолу, тіоколу та ін.) та неорганічних (фторидів та оксидів металів та ін.) речовин показують, що:

– процес горіння частинок магнію є дуже складним, протікає по дифузійному механізму та залежить від великої кількості різних чинників (стану поверхні частинки металу та її середнього розміру, складу та властивостей навколишнього середовища, зовнішнього тиску та ін.);

– процес горіння магнієвих стрічок у суміші кисню з інертними газами протікає у восьми областях з характерними особливостями полум'я, які залежать від концентрації кисню у навколишньому середовищі та зовнішнього тиску;

– частинки Mg у кисневмісних середовищах (O₂, O₂ + N₂, повітря) згорають у дифузійному режимі з утворенням яркої зони свічення, радіус якої збільшується зі зростанням концентрації кисню та зовнішнього тиску;

– час згорання нерухомих частинок Mg у повітрі пропорційний квадрату їх діаметра та залежить від характеру процесу горіння (симетричного або несиметричного);

– час згорання нерухомих частинок Mg у суміші кисень + аргон визначається наступними виразами

симетричне горіння

$$\tau_2 = k \cdot \delta_0^2,$$

де k змінюється обернено пропорційно $\frac{P_k}{P_0}$ (P_k – парціальний тиск кисню; P_0 – загальний тиск суміші); τ_2 (с); δ_0 (10⁻³ м);

несиметричне горіння

$$\tau_2 = 0,56 \cdot \delta_0^2 \cdot \left(\frac{P_0}{P_k}\right)^{1,07};$$

– сильна залежність константи часу горіння $k = \frac{\tau_2}{\delta_0^2}$; частинок Mg у кисневмісних середовищах від радіусу зони свічення вказує на те, що реакції, тепло яких визначає швидкість випаровування Mg, відбувається у газовій фазі; при цьому збільшення концентрації кисню вище 45 %

призводить до того, що величина k стає слабо залежною від розміру зони свічення, хоча вплив концентрації кисню на τ_2 залишається сильним;

–при горінні частинок Mg, що обдуваються газовим потоком $O_2 + N_2$, час їх згоряння зростає зі збільшенням швидкості обдування та вмісту кисню у суміші; при підвищенні температури потоку час згоряння зменшується;

–при згорянні частинок Mg у кисневмісних середовищах маса кінцевого продукту зменшується зі збільшенням вмісту кисню у середовищі: у повітрі вона склала біля 25 %, а при вмісті кисню 1 % дорівнювала масі вихідної речовини; у суміші кисню з аргонем (1...21 % O_2) та азотом (4...21 % O_2) розмір зразка був меншим вихідного на 10 %; у суміші 1 % $O_2 + 99$ % N_2 розмір продукту горіння був більшим вихідного у 1,5...1,7 разу;

–при горінні частинок Mg у суміші водяної пари з азотом навколо частинок спостерігались парофазні промені; при цьому на час горіння τ_2 частинок Mg впливають наступні параметри: величина τ_2 збільшується зі зростанням зовнішнього тиску P до $6,0678 \cdot 10^5$ Па та при подальшому підвищенні тиску істотно не змінюється; показник n у залежності $\tau_2 \sim \delta_0^n$ залежить від зовнішнього тиску ($P = 1,013 \cdot 10^5$ Па... $11,143 \cdot 10^5$ Па), що свідчить про зміну механізму горіння частинок Mg; збільшення концентрації водяної пари, а також заміщення азоту у суміші (35 % $H_2O + 65$ % N_2) воднем призводить до зменшення величини τ_2 ;

–при горінні частинок Mg у вуглекислому газі, на відміну від горіння у повітрі та у суміші кисень + аргон, спостерігаються пульсації світлового випромінювання зони горіння, а швидкість горіння частинок зменшується; при цьому $\tau_2 \sim \delta_0^m$, де $m = 2,2...3,0$, що обумовлено нестационарністю процесу горіння;

–процес горіння конгломератів Mg (середній розмір 12 мкм, порозність 0,5) у оксидному нагрітому середовищі (у атмосфері O_2 , N_2 та Ar) суттєво залежить від його температури (при 863...1023 K): зразок піддавався повільному окисненню, поверхневому окисненню та парофазному горінню з утворенням яскравого білого полум'я.

Список літератури

1. H. Yaman, V. Çelik, E. Degirmenci, Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants. 2014. Fuel 115, 794. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.033>
2. Uhlenhake, K.E.; Yehia, O.R.; Noel, A.; Terry, B.C.; Örnek, M.; Belal, H.M.; Gunduz, I.E.; Son, S.F.. On the Use of FluorineContaining Nano-Aluminum Composite Particles to Tailor Composite Solid Rocket Propellants. Propellants Explos. Pyrotech. 2022. №47. e202100370. <https://doi.org/10.1002/prep.202100370>
3. Skaggs, M.N., Hargather, M.J. & Cooper, M.A. Characterizing pyrotechnic igniter output with high-speed schlieren imaging. Shock Waves 2017. №27. P. 15–25. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0640-5>.
4. Uma Vellaisamy, Shelly Biswas., Effect of metal additives on neutralization and characteristics of AP/HTPB solid propellants. Combustion and Flame, 2020. Volume 221. P. 326-337, ISSN 0010-2180, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.006>.
5. Yasmine Aly, Mirko Schoenitz, Edward L. Dreizin, Ignition and combustion of mechanically alloyed Al–Mg powders with customized particle sizes. Combustion and Flame. 2013 Volume 160. Issue 4, P. 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.011>.
6. Kumar, S., Kumar, S., Soni, P. K., Mehta, D., Kothari, D., Mukherjee, N., & Kishore, P.. New approach for calculation of peak over pressure and impulse of aluminized explosive charges. Journal of Energetic Materials. 2024. P 1–20. <https://doi.org/10.1080/07370652.2024.2340453>.
7. Daniel R. Guildenbecher, Marcia A. Cooper., Walter Gill, Howard Lee Stauffacher, Michael S. Oliver, and Thomas W. Grasser, Quantitative, three-dimensional imaging of aluminum drop combustion in solid propellant plumes via digital in-line holography, 2014. № 39, P. 5126-5129. <https://doi.org/10.1364/OL.39.005126>.
8. Xin, H.; Wang, K.; Ren, H.; Jiao, Q. Comparative Study on Combustion Behavior of Aluminum-Based Alloy Fuels and Aluminum Powder in Solid Propellants. Metals. 2023. № 13. P. 1492. <https://doi.org/10.3390/met13081492>.
9. Діброва О.С., Кириченко О.В., Мотрічук Р.Б., Томенко М.Г., Мельник В.П. Підвищення пожежної безпеки піротехнічних нітратно-металевих сумішей в умовах зовнішніх термічних дій. Technology Audit and Production Reserves. 2020. Том 1 №1 (51), С. 44–49. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.199252>
10. Кириченко О.В., Діброва О.С., Мотрічук Р.Б., Ващенко В.А., Колінько С.О.. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека. 2019. №2(8), 81–85. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.81-85>

11. Кириченко О.В., Діброва О.С., Мотричук Р.Б., Ващенко В.А., Колінько С.О., Цибулін В.В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету. Технічні науки*. 2019. № 3, С. 56-67. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874>
 12. Кириченко, Є., Гвоздь, В., Ващенко, В., Кириченко, О., Дядюшенко, О., Мельник, В.. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згоряння частинок магнію та алюмінію в продуктах розкладання оксидів металів. *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. №2(12), С. 111–121. [https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).111-121](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).111-121)
 13. Кириченко, Є. Дослідження процесів зовнішніх термоударних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах пострілу та польоту. Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація». 2021. №5(2), С. 37-51. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-37-50>
 14. Кириченко Є. П., Ковалишин В. В., Гвоздь В. М., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулін В. В. Дослідження механізму та розробка моделі розвитку процесу горіння піротехнічних сумішей металеве паливо + оксид металу при зовнішніх термічних діях. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 4. С. 68-82. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602>
 15. Кириченко, Є. Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошоків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках. *Збірник наукових праць Черкаського інституту пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація»*. 2022. №6(1), С. 29-42. <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.29-42>
 16. Кириченко Є., Гвоздь В., Кириченко О., Дядюшенко О. Попередження передчасного спрацьовування піротехнічних виробів на основі сумішей з порошоків магнію, алюмінію та оксидів металів в умовах зовнішніх термічних дій, *Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека*. 2022. № 2 (14). С. 35-43. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43>
 17. Кириченко Є. Методика визначення критичних значень параметрів зовнішніх термічних дій на піротехнічні металооксидні вироби в умовах експлуатації. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2022. №2. С. 53-63. <https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2022.257014>
- References**
1. H. Yaman, V. Çelik, E. (2014). Degirmenci, Experimental investigation of the factors affecting the burning rate of solid rocket propellants. *Fuel* 115, 794. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.05.033>
 2. Uhlenhake, K.E.; Yehia, O.R.; Noel, A.; Terry, B.C.; Örnek, M.; Belal, H.M.; Gunduz, I.E.; Son, S.F. (2022). On the Use of Fluorine-Containing Nano-Aluminum Composite Particles to Tailor Composite Solid Rocket Propellants. *Propellants Explos. Pyrotech.*, 47, e202100370. <https://doi.org/10.1002/prep.202100370>
 3. Skaggs, M.N., Hargather, M.J. & Cooper, M.A. (2017). Characterizing pyrotechnic igniter output with high-speed schlieren imaging. *Shock Waves* 27, 15–25. <https://doi.org/10.1007/s00193-016-0640-5>.
 4. Uma Vellaisamy, Shelly Biswas, (2020). Effect of metal additives on neutralization and characteristics of AP/HTPB solid propellants, *Combustion and Flame*, Volume 221, 326-337, ISSN 0010-2180, <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2020.08.006>.
 5. Yasmine Aly, Mirko Schoenitz, Edward L. (2013) Dreizin, Ignition and combustion of mechanically alloyed Al–Mg powders with customized particle sizes, *Combustion and Flame*, Volume 160, Issue 4, 835-842. <https://doi.org/10.1016/j.combustflame.2012.12.011>.
 6. Kumar, S., Kumar, S., Soni, P. K., Mehta, D., Kothari, D., Mukherjee, N., & Kishore, P. (2024). New approach for calculation of peak over pressure and impulse of aluminized explosive charges. *Journal of Energetic Materials*, 1–20. <https://doi.org/10.1080/07370652.2024.2340453>.
 7. Daniel R. Guildenbecher, Marcia A. Cooper, (2014). Walter Gill, Howard Lee Stauffacher, Michael S. Oliver, and Thomas W. Grasser, "Quantitative, three-dimensional imaging of aluminum drop combustion in solid propellant plumes via digital in-line holography," *Opt. Lett.* 39, 5126-5129. <https://doi.org/10.1364/OL.39.005126>.
 8. Xin, H.; Wang, K.; Ren, H.; Jiao, Q. (2023). Comparative Study on Combustion Behavior of Aluminum-Based Alloy Fuels and Aluminum Powder in Solid Propellants. *Metals*, 13, 1492. <https://doi.org/10.3390/met13081492>.
 9. Dibrova, O., Kyrychenko, O., Motrichuk, R., Tomenko, M., Melnyk, V. (2020). Fire Safety Improvement of Pyrotechnic Nitrate-Metal Mixtures under External Thermal Conditions. *Technology Audit and Production Reserves*, 1 (1 (51)), 44–49. doi: <http://doi.org/10.15587/2312-8372.2020.199252>
 10. Kyrychenko, O.V., Dibrova, O.S., Motrichuk, R.B., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O. (2019). The research of ignition and combustion of aluminum and magnesium alloys in the products of decomposition of solid pyrotechnical fuels, *Scientific Bulletin Civil Protection and Fire Safety*, 2 (8), 81-85. <https://doi.org/10.33269/nvcz.2019.2.81-85>
 11. Kyrychenko, O.V., Dibrova, O.S., Motrichuk, R.B., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V. (2019). Investigation of the influence of strength of charges of pyrotechnic nitrate-metal mixtures on fire safety of products on their basis, *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, 3, 56-67.

- <https://doi.org/10.24025/2306-4412.3.2019.176874>
12. Kyrychenko, E., Gvozdz, V., Vashchenko, V., Kyrychenko, O., Dyadushenko, O., Melnyk, V. (2021). Patterns of influence of technological parameters and external factors on the ignition temperature and combustion time of magnesium and aluminum particles in the decomposition products of metal oxides. *Civil defense and fire safety*, 2(12), 111-121.
[https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2\(12\).111-121](https://doi.org/10.33269/nvcz.2021.2(12).111-121)
13. Kyrychenko, Y. (2021). Research of external heat shock processes for pyrotechnic metal oxide products in conditions of shooting and flight. *Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety*, 5(2), 37-51.
<https://doi.org/10.31731/2524.2636.2021.5.2-37-50>
14. Kyrychenko, Y.P., Kovalyshyn, V.V., Gvozdz, V.M., Vashchenko, V.A., Kolinko, S.O., Tsybulin, V.V. (2021). Study of the mechanism and development of a model of the development of the combustion process of pyrotechnic mixtures of metal fuel + metal oxide under external thermal effects. *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, 4, 68-82.
<https://doi.org/10.24025/2306-4412.4.2021.251602>
15. Kyrychenko, Y. (2022). Study of the processes of ignition and development of combustion of two-component pyrotechnic mixtures from magnesium, aluminum powder and metal oxides at elevated heating temperatures and external pressures. *Collection of scientific works of the Cherkasy Institute of Fire Safety*, 6(1), 29-42.
<https://doi.org/10.31731/2524.2636.2022.6.1.29-42>
16. Kyrychenko, I., Hvozdz, V., Kyrychenko, O., & Diadiushenko, O. (2022). Prevention of previous operation of charges of pyrotechnical products based on mixtures of magnesium, aluminum powder and metal waste in the conditions of external thermal actions. *Civil defense and fire safety*, 2(14), 35-43.
<https://doi.org/10.33269/nvcz.2022.2.35-43>
17. E. P. Kirichenko (2022). Technique for determination of critical values of parameters of external thermal actions on pyrotechnical metal oxide products in operating conditions. *Bulletin of the Cherkasy State Technological University*, 2, 53-63.
<https://doi.org/10.24025/2306-4412.2.2022.257014>

Надійшла до редакції 05.11.2024

Рецензент д-р. техн. наук, доц. Олександр НУЯНЗІН

Козяр Назарій Михайлович – кандидат технічних наук, докторант, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: koziar_nazarii@chipb.org.in

Кириченко Оксана В'ячеславівна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (18034, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна).

E-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in

Ващенко В'ячеслав Андрійович – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри, Черкаський державний технологічний університет, (18006, бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна).

E-mail: kaf-physics@ukr.net

Школяр Євгеній Володимирович – кандидат психологічних наук, викладач кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: shkolyar_87@ukr.net

Куценко Марія Анатоліївна – кандидат економічних наук, доцент докторант, Національний університет цивільного захисту України, (вул. Чернишевська, 94, м. Харків, Україна, 61023).

E-mail: kutsenko_mariia@chipb.org.in

Томенко Марина Григорівна – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (18034, вул. Онопрієнка, 8, м. Черкаси, Україна).

E-mail: tomenko_maryna@chipb.org.in

Гончар Сергій Вікторович – викладач кафедри, Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України, (вул. Онопрієнка, 8; м. Черкаси, Україна, 18034).

E-mail: honchar_serhii@chipb.org.in

Колінько Сергій Олександрович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри, Черкаський державний технологічний університет, (18006, бул. Шевченка, 460, м. Черкаси, Україна).

E-mail: kaf-physics@ukr.net

REGULARITIES OF THE COMBUSTION PROCESS OF METALLIC FUEL PARTICLES IN THE DECOMPOSITION PRODUCTS OF PYROTECHNIC MULTICOMPONENT NITRATE-METALLIZED MIXTURES

Purpose. The analysis and identification of regularities of the combustion process of magnesium particles in active gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers and additives of the specified substances for determining the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under external thermal conditions.

Methods. Modern methods of physical and chemical analysis: thermocouple methods of temperature measurement (tungsten-rhenium thermocouples were used); non-contact methods of recording the beginning and end of the burning of metal

particles (temperature indicators, photosensitive elements, etc.); film shooting methods (film camera "Konvas-auto" (shooting speed 30 frames/s)) and methods of micro-filming SKS-1M film camera (shooting speed 3000...5000 frames/s) of the burning process of individual metal particles; methods of X-ray structural and micro-X-ray spectral analysis (MRSA) for chemical analysis.

The results. Data on the combustion of magnesium particles in active gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers, organic and inorganic substances are systematized and summarized. It was found that the combustion of magnesium particles is highly complex, occurring through a diffusion mechanism influenced by a variety of factors. Additionally, the combustion of magnesium ribbons in a mixture of oxygen and inert gases occurs in eight distinct regions, each with characteristic flame features that depend on oxygen concentration and external pressure. It was established that magnesium particles burn in oxygen-containing media in the diffusion mode with the formation of a bright glow zone, the radius of which increases with increasing oxygen concentration and external pressure.

Scientific novelty. For the first time, regularities of the combustion process of magnesium particles in active gaseous products were established (O_2 , $O_2 + N_2$, air, CO_2 , water vapor, etc.) thermal decomposition of nitrate-containing oxidants (O_2 , $O_2 + N_2$, air, CO_2 , water vapor etc.) and additives of organic substances (paraffin, stearin, iditol, thiocol, etc.) and inorganic substances (metal fluorides and oxides, etc.) to determine the fire-hazardous properties of pyrotechnic mixtures under conditions of external thermal effects.

Practical significance. The theoretical and experimental results, presented as mathematical models and a database of experimental data, demonstrate the influence of technological parameters of mixture charges on the critical modes of explosive combustion under external thermal conditions (elevated temperatures, external pressures, etc.). These results enable the optimization of technological parameters (e.g., component ratios, dispersion of metallic fuel) during product manufacturing, increasing ignition temperatures and reducing the likelihood of fire-explosive destruction during storage, transportation, and product use under thermal conditions.

Key words: pyrotechnic multi-component nitrate-metallized mixtures, fire safety, metal fuels, combustion processes.

Nazariy Kozyar – Candidate of Technical Sciences, Postdoctoral Fellow, National University of Civil Defence of Ukraine, (Chernyshevska Str., 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: kozyar_nazarii@chipb.org.in

Oksana Kyrychenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Defence of Ukraine, (18034, 8 Onoprienko Str., Cherkasy, Ukraine).

E-mail: kyrychenko_oksana@chipb.org.in

Vyacheslav Vaschenko – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Cherkasy State Technological University, (18006, 460 Shevchenko Blvd., Cherkasy, Ukraine).

E-mail: kaf-physics@ukr.net

Ievhenii Shkoliar – Candidate of Technical Sciences, Lecturer, Cherkasy Institute of Fire Safety name of the National University of Civil Defence of Ukraine, (Onoprienko Str., 8, Cherkasy, Ukraine, 18034).

E-mail: shkolyar_87@ukr.net

Kutsenko Mariia – Candidate of Economic Sciences, Associate Professor, Postdoctoral Fellow, National University of Civil Protection of Ukraine, (Chernyshevska Street, 94, Kharkiv, Ukraine, 61023).

E-mail: kutsenko_mariia@chipb.org.in

Tomenko Maryna – Candidate of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine, (18034, Onoprienko Street, 8, Cherkasy, Ukraine).

E-mail: tomenko_maryna@chipb.org.in

Honchar Serhii – lecturer, Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of the National University of Civil Protection of Ukraine, (Onoprienko Street, 8, Cherkasy, Ukraine 18034).

E-mail: honchar_serhii@chipb.org.in

Kolinko Serhii – Candidate of physical and mathematical sciences, Associate Professor, Cherkasy State Technological University, (18006, Shevchenko Boulevard, 460, Cherkasy, Ukraine).

E-mail: kaf-physics@ukr.net