

УДК 614.841:536.46

DOI: <https://doi.org/10.31731/2524.2636.2024.8.2.44.56>

*Назарій КОЗЯР¹, канд. техн. наук (ORCID: 0000-0001-9082-0771),
Оксана КИРИЧЕНКО², д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0002-0240-1807),
Вікторія КОВБАСА² (ORCID: 0000-0002-9479-669X),
Вячеслав ВАЩЕНКО³, д-р техн. наук, професор (ORCID: 0000-0003-0722-9353),
Марія КУЦЕНКО¹, канд. економ. наук, доцент, (ORCID: 0000-0001-6879-9187),
Євгеній ШКОЛЯР², канд. психол. наук (ORCID: 0000-0002-7304-1677),
Ігор НОЖКО², канд. пед. наук (ORCID: 0000-0003-1554-0088),
¹Національний університет цивільного захисту України,
²Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України,
³Черкаський державний технологічний університет*

ВИЗНАЧЕННЯ ПРОЦЕСІВ ЗАЙМАННЯ ЧАСТИНОК МЕТАЛЕВИХ ПАЛЬНИХ У ПРОДУКТАХ РОЗКЛАДАННЯ ПІРОТЕХНІЧНИХ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ НІТРАТНО-МЕТАЛІЗОВАНИХ СУМІШЕЙ

Представлено результати експериментальних досліджень процесу займання магнію у газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів), добавок органічних та неорганічних речовин, які входять у склад піротехнічних багатокомпонентних нітратно-металізованих сумішей, що передують процесу розвитку горіння сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Ключові слова: *піротехнічні суміші, металеві пальні, нітратовмісні окиснювачі, органічні та неорганічні речовини, процеси займання та горіння.*

Постановка проблеми. У теперішній час піротехнічні вироби на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних (магнію, алюмінію та ін.), нітратовмісних окиснювачів (нітратів лужних та лужноземельних металів та ін.), добавок органічних (парафіну, стеарину, ідиолу, тіоколу та ін.) та неорганічних (фторидів та оксидів металів та ін.) речовин широко використовуються у різних галузях народного господарства та військової техніки (освітлювальні, сигнальні та трасувальні засоби, спалахувальні та запалювальні патрони та снаряди, піротехнічні ПЧ-випромінювачі, елементи ракетно-космічної техніки та ін.) [1 – 6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В умовах вимушеного зовнішнього нагріву (наприклад, при спалахуванні складських приміщень, де зберігаються піротехнічні вироби, споряджені зарядами з розглядуваних сумішей, при транспортуванні в умовах інтенсивного колективного нагріву їх поверхонь, або при ударних теплових впливах на металеві корпуси виробів в умовах пострілу та польоту) піротехнічні суміші можуть передчасно спалахувати з різким прискоренням подальшого процесу їх згорання, з руйнуванням виробів з утворенням високотемпературних продуктів згорання, які розлітаються з великими швидкостями у різні боки будучи пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (навколишніх споруд, паливно-матеріалів, пускових установок з обслуговуючим персоналом) [1 – 3].

Тому для попередження передчасного пожежовибухонебезпечного руйнування виробів в умовах зовнішніх термічних дій необхідно, у першу чергу, мати дані про закономірності процесу займання частинок металевих пальних у

газоподібних продуктах термічного розкладання окиснювачів та добавок органічних та неорганічних речовин, який передую процесу вибухонебезпечного розвитку горіння сумішей у вказаних умовах. У теперішній час окремі дані по займанню частинок металів у активних газоподібних середовищах знаходяться у ряді монографій, наукових статей та праць [7 – 15], що утруднює як встановлення закономірностей процесу їх займання в умовах, близьких до реальних умов горіння піротехнічних сумішей, так й оперативне їх використання у якості керованої бази даних по властивостям компонентів сумішей, що характеризує їх пожежонебезпечні властивості в умовах зовнішніх термічних дій.

Постановка задачі та її розв'язання. Систематизація та узагальнення вказаних даних на даний момент відсутні. Тому метою даної роботи є аналіз та встановлення закономірностей процесу займання частинок магнію у активних газоподібних продуктах термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів та добавок розглядуваних речовин для визначення пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термічних дій.

Виклад основного матеріалу дослідження. Усі дослідження проводились з порошками магнію, що випускаються піротехнічною промисловістю, на стандартному піротехнічному обладнанні з використанням сучасних методів фізико-хімічного аналізу [1, 3]: методів кінозйомки та мікрокінозйомки, контактних та безконтактних методів вимірювання температури, методів рентгеноструктурного аналізу та ін. Ініціювання процесу займання частинок металевих палих у окиснювальних газоподібних середовищах здійснювались за допомогою керованого ІЧ-нагріву кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 з застосуванням термодатчиків РИФ-101 для контролю температури нагріву в діапазоні 300...1900 К [1, 3]. За температуру займання (T_z , К) частинок металів у газоподібному середовищі приймалась її мінімальна температура, при якій починався процес їх горіння. При цьому відносна похибка вимірювання T_z та часу індукції при займанні частинок металу (τ_i , с) не перевищувала 5...7 %. В результаті проведених досліджень [16, 17] було встановлено, що при температурах, властивих конденсованій фазі піротехнічних сумішей в умовах їх займання та розвитку горіння, основними газоподібними продуктами термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів (NaNO_3 , KNO_3 , $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$ та ін.) та розглядуваних речовин (парафіну, стеарину, ідиолу та ін.) є O_2 , N_2 , CO_2 , пара H_2O та ін. Тому нижче розглядаються результати досліджень процесів займання магнію у вказаних газоподібних продуктах, включаючи повітря, основою якого є суміш $\text{O}_2 + \text{N}_2$.

Виходячи з високої хімічної активності і легкості випаровування при відносно низьких (до 423 К) температурах магній віднесений до найбільш легкозаймистих металів. Займання Mg на повітрі досягається навіть у випадку, коли він має форму крупних шматків або пластинок, при температурах 873...923 К.

Магній здатний окислюватися не тільки у газоподібних середовищах, які містять молекули або атоми кисню у вільному стані. Окиснення Mg проходить і в ряді газів, у яких кисень зв'язаний (CO_2 , H_2O тощо).

При займанні у сумішах кисню з аргоном горизонтально розташованих магнієвих стрічок шириною $2,9 \cdot 10^{-3}$ м, довжиною $8 \cdot 10^{-2} \dots 10^{-1}$ м і товщиною приблизно 150 мкм посередині між електродами (займання проводилось шляхом електронагріву стрічки) виникало парофазне полум'я у вигляді тору, який оточував стрічку. Розповсюдження цього полум'я вздовж стрічки приводило до займання усього зразку.

Встановлено, що процес займання починався при температурах середовища, значно нижчих, ніж температура плавлення магнію. Світіння полум'я зростало до максимуму за час менше 10^{-3} с. Характер займання суттєво не залежав від тиску і концентрації кисню.

Також зазначалось, що процес займання частинок Mg має не дифузійний, а гетерогенний характер, обумовлений хімічними реакціями на поверхні частки. В результаті екзотермічного ефекту температура частки підвищується до значення, при якому проходить інтенсивне випаровування металу, яке приводить до появи дифузійного полум'я.

У суміші $\text{CO}_2 + \text{O}_2$ займання магнієвих стрічок проходить тільки при відносно високих значеннях тисків і мольних часток кисню (рис. 1), а у суміші $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ магнієва стрічка не горить зовсім.

Експерименти з займання частинок Mg в атмосфері водяної пари при температурі 850...870 К показали, що реакція взаємодії магнію з водяною парою до моменту виникнення полум'я є гетерогенною.

Гетерогенний характер займання Mg не виключає, однак, наступного переходу від поверхневого горіння до об'ємного. Обробкою дослідних даних зі спалювання часток магнію в окислювальних середовищах отримано такий вираз для рівняння швидкості окислення (за масою) споживаного кисню у передзаймовий період:

середовище: кисень + азот

$$K = 2 \cdot 10^{32} \cdot \rho^{1/2} \cdot n_k^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{142600}{RT}\right) \text{ (кг/м}^2\cdot\text{с); (1)}$$

середовище: водяна пара

$$K = 0,254 \cdot 10^9 \cdot \rho^{1/2} \cdot n_{\text{вп}}^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{40470}{RT}\right) \text{ (кг/м}^2\cdot\text{с); (2)}$$

де ρ – густина середовища; n_k – відносна масова концентрація кисню; $n_{\text{вп}}$ – відносна масова концентрація водяної пари.

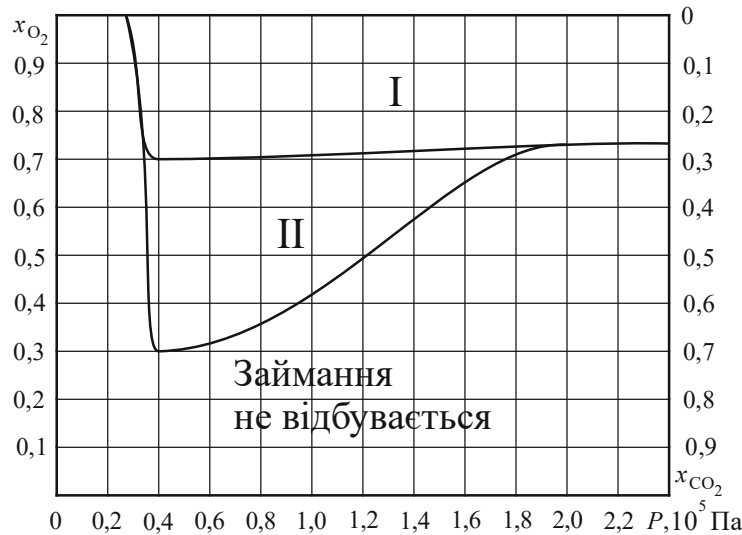


Рисунок 1 – Режими горіння магнієвої стрічки в суміші газів O_2 і CO_2 (x – мольні частки)

Температура займання одиночних частинок Mg розміром 15...55 мкм перебуває в межах 923...953 К і зростає при зменшенні діаметра частинок. Однак при підвищенні концентрації частинок Mg спостерігається зворотна залежність, яка пояснюється зменшенням втрат тепла із внутрішніх швидкостей.

Значення температур займання магнію і деяких його сплавів у повітрі та вуглекислому газі наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Температура займання Mg і його сплавів, К

Метал або сплав	$P = 1,013 \cdot 10^5$ Па		$P = 15,2 \cdot 10^5$ Па			
	Сухе повітря	Вологе повітря (1,8 ваг. % H_2O)	Сухий CO_2	Вологий CO_2 (1,2 ваг. % H_2O)	Сухий CO_2	Вологий CO_2 (0,08 ваг. % H_2O)
Mg	918	883	1153	923	1193	1053
Mg-Zr	918	888	1163	933	1213	1073
Mg-Zr-Zn	913	873	1143	953	1193	1053
Магнокс	923	898	1153	943	1218	1073

Температура займання магнію у кисні залежить від тиску: при атмосферному тиску вона дорівнює 896 К, із зменшенням або ростом тиску вона зростає (при тисках $0,17 \cdot 10^5$ Па та $6 \dots 10 \cdot 10^5$ Па – досягає 918 К).

При спалюванні відносно крупних сферичних частинок Mg у суміші кисню з азотом отримані значення температур займання, наведені в таблиці 2.

Таблиця 2 – Температура займання частинок Mg, К

δ , мкм	520	1000	1470
T_3 (21 % O_2)	903	898	896
T_3 (1 % O_2)	925	916	913

У чистих парах води при атмосферному тиску температура займання складає 903 К.

Значення температури займання частинок магнію у повітрі і суміші водяної пари з азотом за результатами досліджень показано на рис. 2 – 4. Дані з займання частинок Mg у повітрі отримані на установці з підігрівом газу силітовими або ніхромовими підігрівачами; з займання у водяній парі – у плоскополум'яному пальнику суміші кисню з воднем.

Таким чином, практично всі експерименти показують, що займання Mg проходить при температурах, при яких оксидна плівка на частинках залишається твердою.

Різниця в точках зору на характер займання частинок пояснюється різницею у розумінні структури оксидної плівки, яка покриває частинку Mg.

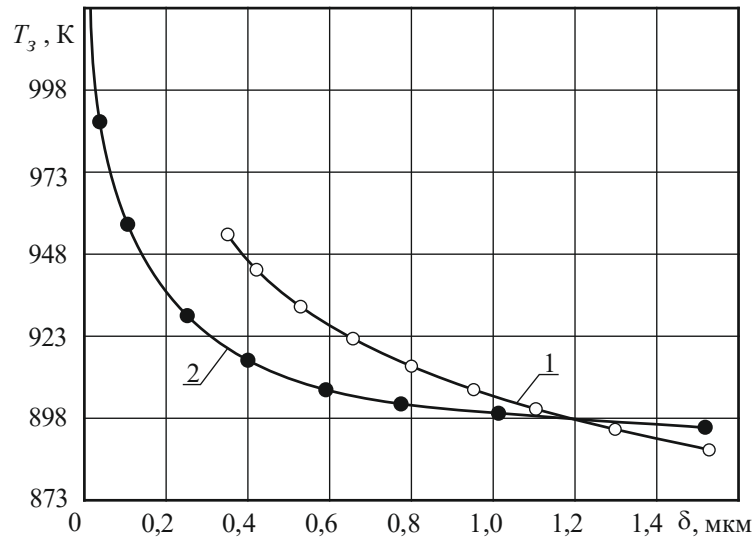


Рисунок 2 – Температура займання частинок магнію у повітрі (2) і суміші 35 % $H_2O + 65\% N_2$ (1) при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па; \circ, \bullet – експериментальні дані

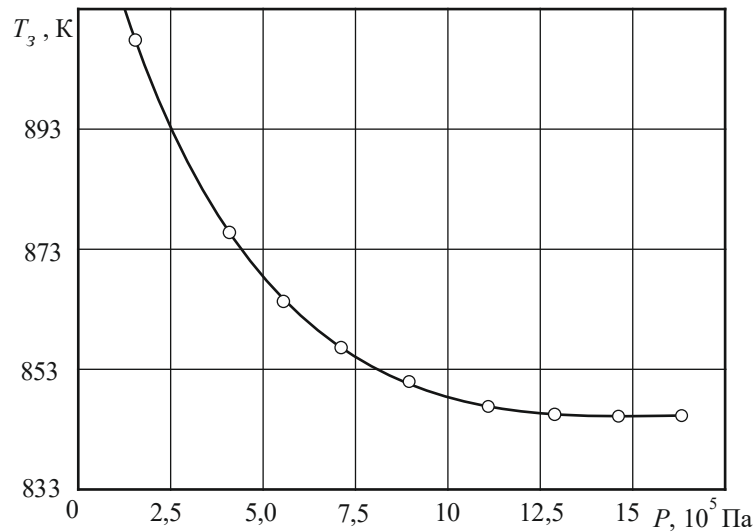


Рисунок 3 – Температура займання частинок магнію в суміші 35 % $H_2O + 65\% N_2$ залежно від тиску; \circ – експериментальні дані

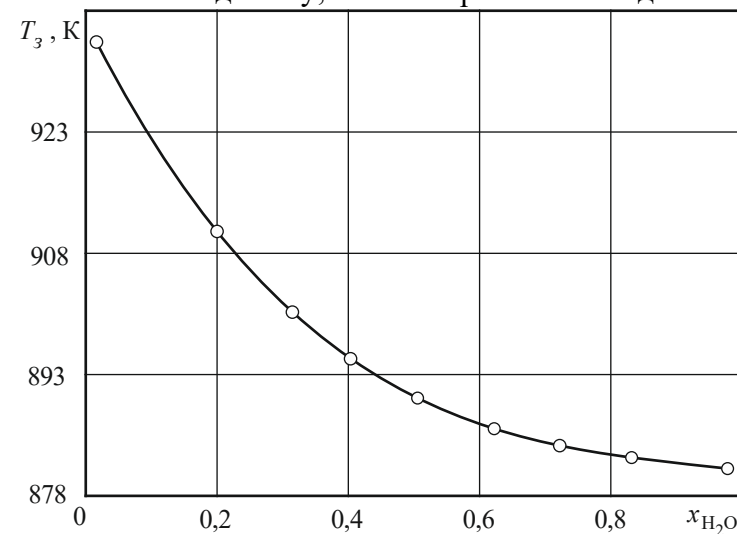


Рисунок 4 – Температура займання частинок магнію залежно від вмісту водяної пари (масової частки) при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па; \circ – експериментальні дані

Згідно з однією з них, оскільки для Mg критерій Піллінга-Бедворса менший одиниці, оксидна плівка, яка є крихкою, не має захисні властивості. В результаті швидкість окиснення лімітується швидкістю гетерогенної реакції.

Згідно з другою, під крихким шаром основної маси оксиду на поверхні частинки існує тонкий шар Mg, дифузія окиснювача, який і лімітує швидкість окиснення часток Mg при їх займанні у газофазному активному середовищі.

Встановлено, що період індукції магнієвих частинок звичайно пропорційний квадрату діаметра частинки. У той же час показано, що для середовища, яке містить по об'єму 35 % водяної пари (інше – азот), при тиску $1,013 \cdot 10^5$ Па залежність періоду індукції від розміру частинок слабкіша квадратичної таблиці 3.

Таблиця 3 – Час індукції частинок Mg при займанні у середовищі 35 % H₂O + 65 % N₂

$T = 975 \text{ K}$				$T = 1053 \text{ K}$			
$\delta, 10^{-3} \text{ м}$	Re	Nu	$\tau_i, \text{ с}$	$\delta, 10^{-3} \text{ м}$	Re	Nu	$\tau_i, \text{ с}$
0,50	3,8	3,17	2,34	0,61	5,90	3,46	2,00
0,65	4,92	3,33	3,04	0,77	7,46	3,64	2,56
0,78	5,92	3,46	3,46	0,97	9,40	3,84	3,38
0,95	7,20	3,61	5,28	1,04	10,0	3,90	3,26
1,13	8,54	3,75	5,72	1,17	11,3	4,01	4,02
1,44	0,9	3,98	8,10	1,46	14,2	4,36	5,22

Зміна періоду індукції з ростом температури середовища показано на рисунку 5.

Дослідження процесу займання нерухомо підвішених сферичних частинок магнію (активністю не нижче 99 %) діаметром 100...1000 мкм, проведене за допомогою малоінерційних термопар і швидкісної мікрокінозйомки, показало, що в усіх середовищах (повітря, суміш кисень – аргон, вуглекислий газ, водяна пара) займання Mg носить гетерогенний характер.

При спалюванні магнієвих частинок у повітрі або суміші кисень – аргон процес окиснення і займання розвивається рівномірно по усій поверхні частинки. Займання при цьому проходить при температурах поверхні частинок, які перевищують температуру плавлення Mg (920...970 K).

Конденсований оксид магнію у цих умовах являє собою пористу плівку. Суміш парів магнію з окиснювачем оточуючого середовища, яка утворюється при нагріві навколо частинки, підпалюється від нагрітої частинки. Це приводить до появи симетричного сферичного фронту полум'я – зони взаємодії парів Mg з киснем, яка зростає.

Таким чином, процес займання Mg являє собою нестационарний процес горіння, при якому має місце перехід реакції з поверхні частинки у зовнішній об'єм.

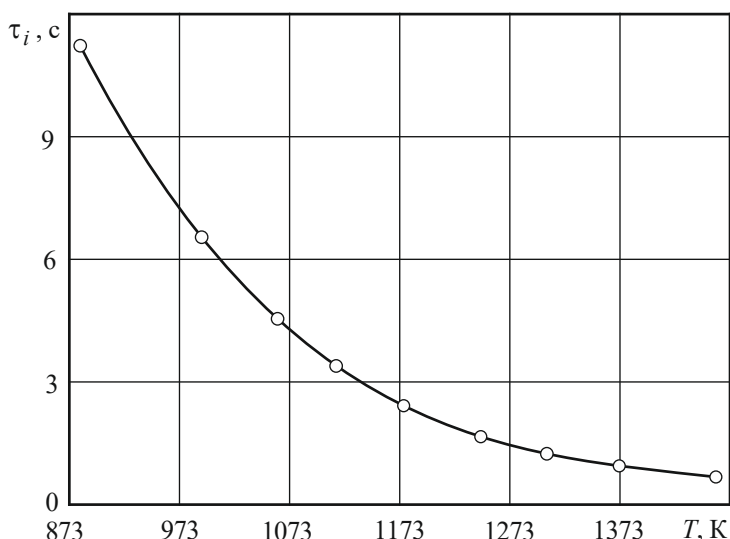


Рисунок 5 – Залежність часу індукції частинки магнію від температури середовища; ○ – експериментальні дані.

Тривалість формування зони світіння для частинок розміром 100...1000 мкм складає $0,1...1 \cdot 10^{-3}$ с (наприклад, для часток діаметром 250 мкм час індукції $\tau_i = 0,8 \cdot 10^{-3}$ с).

При спалюванні частинок магнію у вуглекислому газі (температура середовища 290 К) встановлені суттєві відмінності в розвитку процесу займання порівняно з повітряним середовищем або середовищем кисень – аргон.

На поверхні частинки спостерігаються локальні джерела, в яких проходить займання; при цьому утворюється неоднорідна зона світіння, яка складається із сукупності окремих факелів, у яких проходить взаємодія парів Mg з вуглекислим газом.

При займанні частинок Mg в парах води (температура середовища 390 К) у передзаймовий період утворюється, поряд з конденсованим MgO, значна кількість газоподібного продукту (H₂), який, вочевидь, суттєво впливає на хід процесу.

Швидкісна кінозйомка показує, що до початку нагріву на поверхні частинки помітні відблиски – ділянки з підвищеною відбивальною здатністю. При нагріванні частинки відблиски зникають, і поверхня частинки стає матовою. Потім настає плавлення, яке супроводжується збільшенням розмірів частинки, після якого її поверхня спучується в одному або декількох місцях.

В момент займання від поверхні частинки піднімається пластівчаста хмара MgO, яка швидко збільшується до певного розміру (відношення радіуса хмари до початкового радіуса частки при тиску H₂O, рівному $1,013 \cdot 10^5$ Па, дорівнює 2...2,2). Цей розмір залишається практично постійним у процесі стаціонарного горіння. Температура поверхні частинки (виміряна малоінерційною термопарою) в момент займання була на 100 К нижчою, ніж при займанні у повітрі.

На температуру займання впливає концентрація частинок магнію. Наприклад, температура займання конгломератів частинок, зчеплених між собою, нижча температури займання одиночних частинок. За результатами роботи, де в сумішах кисню з азотом та аргонном спалювались зразки конгломератів з еквівалентними діаметрами 0,57 і 0,8 та пористістю (відношенням об'єму пустот до об'єму конгломерату) 0,5, були отримані значення температур займання відповідно 876 К і 867 К (зразки пресувалися з часток Mg із середнім діаметром приблизно 12 мкм).

При цьому межа займання підвищувалась із зменшенням вмісту кисню, основні результати представленні в таблиці 4.

Таблиця 4 – Температура займання конгломератів Mg (діаметр $0,8 \cdot 10^{-3}$ м)

Вміст компонентів, %			T_z , К
O ₂	N ₂	Ar	
21	79	–	865
4	96	–	867
4	16	80	867
1	4	95	870
1	99	–	898

В цій роботі встановлено, що при температурах середовища вище граничної T_z парофазному займанню завжди передувало поверхневе займання конгломератів.

При вивченні впливу легуючих елементів (Ni, Bi, Zn, Ag, Cu, Sn, Pb, Sb, In, Al) на температуру займання твердого магнію в сухому кисні було встановлено, що до концентрації в декілька відсотків добавки всіх цих металів викликають зниження температури займання. Наприклад, алюміній знижує температуру займання з 896 К для чистого Mg до 776 К при вмісті 18 % алюмінію (тиск кисню – $1,013 \cdot 10^5$ Па).

На основі цих експериментів зроблений висновок про те, що величина температури займання магнієвих сплавів зворотно пропорційна лінійній швидкості окислення.

Схильність магнію до займання різко зменшується при присутності в атмосфері 0,5 % фториду кремнію. Одночасно присутність у повітрі 1...0,3 % фториду кремнію або сірчаного ангідриду і 1...0,2% фториду бору не тільки запобігає займанню магнію, але й припиняє його горіння.

Висновки.

Систематизація, аналіз та узагальнення даних по займанню частинок магнію у активних газоподібних продуктах (O₂, N₂, CO₂, CO та пара H₂O) термічного розкладання нітратовмісних окиснювачів, органічних та неорганічних речовин показують, що:

– процес займання частинок Mg є дуже складним та залежить від великої кількості різних чинників (стану поверхні частинки металу та властивостей навколишнього середовища та ін.);

– швидкість окиснення магнію (за масою) на різних стадіях визначається складом оксидної плівки на його поверхні, утворення якої залежить від орієнтації поверхні, наявності домішок у металі та у газоподібному середовищі тощо; при цьому, швидкість окиснення магнію у суміші O₂ + N₂ або водяній парі більше, ніж у 5...6 разів вище, ніж у CO₂ та CO, та у передзаймовий період підпорядковується наступним рівнянням:

середовище: кисень + азот

$$K = 2 \cdot 10^{32} \cdot \rho^{1/2} \cdot n_k^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{142600}{RT}\right) \text{ (кг/м}^2 \cdot \text{с);}$$

середовище: водяна пара

$$K = 0,254 \cdot 10^9 \cdot \rho^{1/2} \cdot n_{\text{вп}}^{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{40470}{RT}\right) \text{ (кг/м}^2 \cdot \text{с),}$$

де ρ – густина середовища; n_k – відносна масова концентрація кисню; n_{en} – відносна масова концентрація водяної пари;

– процес займання частинок Mg у повітрі або суміші кисень + аргон відбувається при температурах, які перевищують температуру плавлення магнію (920...970 K) та розвивається рівномірно по усій поверхні частинки;

– температура займання одиничних частинок Mg у суміші $O_2 + N_2$ зростає зі зменшенням її діаметру, відносної масової концентрації кисню та зростанням зовнішнього тиску;

– температура займання одиничних частинок Mg у суміші водяна пара + N_2 зменшується зі збільшенням їх діаметру, відносної масової концентрації водяної пари та зовнішнього тиску;

– період індукції частинок Mg у кисневмісних середовищах пропорційний квадрату їх діаметра та зменшується зі зростанням температури навколишнього середовища;

– збільшення концентрації легуючих елементів (Ni, Bi, Zn, Ag, Cu, Sn, Pb, Sb, In, Al) у твердий Mg до декількох відсотків призводить до зниження температури займання частинок Mg у суміші $O_2 + N_2$ або O_2 на 15...20 %;

– схильність частинок Mg до займання у різних газоподібних середовищах різко зменшується у присутності до 0,5 % фториду кремнію, а одночасна присутність у середовищі 0,3...1,0 % фториду кремнію та 0,2...1 % фториду бору не тільки запобігає займанню частинок Mg, але й припиняє їх горіння.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Ващенко В. А., О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. І. Заїка Процеси горіння металізованих конденсованих систем. *Монографія*. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.

2. Аналітична довідка про пожежі та їх наслідки в Україні за 12 місяців 2022 року: Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту Режим доступу: <https://idundcz.dsns.gov.ua/>.

3. Кириченко О. В., П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. *Монографія*. – К.: Наукова думка, 2012. – 318 с.

4. Balanyuk V. M. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures / V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, O. I. Garasymuyk // Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science. Kharkiv, 2016. – # 3/10 (71). – P. 4 – 12.

5. Balanyuk V. M. Effect of ecologically safe gas- aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane / V. M. Balanyuk, V. V. Kovalyshyn, N.M. Kozyar // Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science. –Kharkiv, 2017. – # 4/10 (88). – P. 12 – 18.

6. Kyrychenko I. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures / I. Kyrychenko, O. Diadiushenko, O. Kyrychenko, O. Dibrova // Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2022. – Vol. 334. – P. 115 – 123.

7. Кириченко Є., Гвоздь В., Ващенко В., Кириченко О., Дядюшенко О., Мельник В. Закономірності впливу технологічних параметрів та зовнішніх чинників на температуру займання та час згорання частинок магнію та алюмінію

в продуктах розкладання оксидів металів. *Цивільний захист та пожежна безпека*. 2021. № 2(12). С. 111–121.

8. 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 пальне + оксид металу при зовнішніх термічних діях. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 4. С. 68–82.

9. Кириченко О. В. Високотемпературне окислення алюмінію в продуктах розкладання окислювачів та органічних речовин піротехнічних сумішей в умовах зовнішнього нагріву / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін, В. М. Тупицький // *Науковий вісник УкрНДІПБ*, 2011. – № 1(24). – С. 47 – 53.

10. Кириченко Є. Дослідження процесів займання та розвитку горіння двокомпонентних піротехнічних сумішей з порошків магнію, алюмінію та оксидів металів при підвищених температурах нагріву та зовнішніх тисках. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2022. Том 6. № 1. С. 29–42.

11. Кириченко О. В., Мотрічук Р. Б., Діброва О. С., Мельник В. П., Ващенко В. А., Бутенко Т. І. Дослідження спалахування та горіння частинок металевого пального у продуктах розкладання нітратовмісних окиснювачів та органічних речовин при зовнішніх термічних впливах. *Збірник наукових праць “Проблеми пожежної безпеки”*. 2020. № 47. С. 50–59.

12. Кириченко О. В. Керована база даних по часам згорання частинок металевих палих в продуктах розкладання піротехнічних сумішей / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко та ін. // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2012. – № 4. – С. 78 – 83.

13. Кириченко О. В. Керована база даних по часам згорання частинок металевих палих в продуктах термічного розкладання піротехнічних нітратно-металевих сумішей / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. М. Тупицький // *Матеріали 14 Всеукраїнської науково-практичної конференції рятувальників*, 26 вересня 2012 р., м. Київ. – Київ: Інститут державного управління у сфері цивільного захисту МНС України, 2012. – С. 213 – 216.

14. Кириченко О. В. Дослідження спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у продуктах розкладання твердих піротехнічних палив / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько // *Науковий вісник “Цивільний захист та пожежна безпека”*, 2019. – № 2(8) (ISSN 2518-1777). – №2 (8). – С. 81 – 85.

15. Кириченко О. В. Швидкість та межі горіння піротехнічних нітратно-магнієвих сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / Кириченко О. В., Ващенко В. А., Цибулін В. В., Тупицький В. М. // *Проблеми пожежної безпеки*. – Харків: НУЦЗУ, 2013. – № 34. – с. 73 – 95.

16. Кириченко О. В. Термічне розкладання добавок органічних речовин в піротехнічних сумішах в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*, 2011. – № 4. – С. 116 – 120.

17. Кириченко О. В. Термічне розкладання нітратовмісних окислювачів піротехнічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко // *Науковий вісник УкрНДІПБ*, 2012. – № 1(25). – С. 126 – 136.

REFERENCES

1. Vashchenko V. A., O. V. Kyrychenko, Yu. H. Leha, P. I. Zaika Protsesy horinnia metalizovanykh kondensovaniykh system. Monohrafiia.– K.: Naukova dumka, 2008. – 745 s.
2. Analitychna dovidka pro pozhezhi ta yikh naslidky v Ukraini za 12 misiatsiv 2022 roku: Instytut derzhavnogo upravlinnia ta naukovykh doslidzhen z tsyvilnogo zakhystu Rezhym dostup: <https://idundcz.dsns.gov.ua/>.
3. Kyrychenko O. V., P. S. Pashkovskiy, V. A. Vashchenko, Yu. H. Leha. Osnovy pozhezhoi bezpeky pirotekhnichnykh nitratovmisnykh vyrobiv v umovakh zovnishnikh termovplyviv. Monohrafiia. – K.: Naukova dumka, 2012. – 318 s.
4. Balanyuk V. M. Study of fire-extinguishing efficiency of environmentally friendly binary aerosol-nitrogen mixtures / V. M. Balanyuk, N. M. Kozyar, O. I. Garasymuyk // Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science. Kharkiv, 2016. – № 3/10 (71). – P. 4 – 12.
5. Balanyuk V. M. Effect of ecologically safe gas- aerosol mixtures on the velocity of explosive combustion of n-heptane / V. M. Balanyuk, V. V. Kovalyshyn, N.M. Kozyar // Eastern-European journal of enterprise technologies. Technical science. –Kharkiv, 2017. – № 4/10 (88). – P. 12 – 18.
6. Kyrychenko I. Investigation of the Regularities of the Influence of Technological Factors and External Conditions on the Temperature and Content of Condensed Products Oxide-Containing Mixtures / I. Kyrychenko, O. Diadiushenko, O. Kyrychenko, O. Dibrova // Solid State Phenomena. Trans Tech Publications Ltd, Switzerland, 2022. – Vol. 334. – P. 115 – 123.
7. Kyrychenko Ye., Hvozd V., Vashchenko V., Kyrychenko O., Diadiushenko O., Melnyk V. Zakonomirnosti vplyvu tekhnolohichnykh parametriv ta zovnishnikh chynnykiv na temperaturu zaimannia ta chas zghoriannia chastynok mahniuu ta aliuminiuu v produktakh rozkladannia oksydiv metaliv. Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezha bezpeka. 2021. № 2(12). С. 111–121.
8. Kyrychenko Ye. P., Kovalyshyn, V. V., Hvozd, V. M., Vashchenko, V. A., Kolinko, S. O., Tsybulin, V. V. Doslidzhennia mekhanizmu ta rozrobka modeli rozvytku protsesu horinnia pirotekhnichnykh sumishei metaleve palne + oksyd metalu pry zovnishnikh termichnykh diiakh. Visnyk Cherkaskoho derzhavnogo tekhnolohichnogo universytetu. 2021. № 4. S. 68–82.
9. Kyrychenko O. V. Vysokotemperaturne okyslennia aliuminiuu v produktakh rozkladannia oksyliuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pirotekhnichnykh sumishei v umovakh zovnishnogo nahrivu / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin, V. M. Tupytskyi // Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2011. – № 1(24). – S. 47 – 53.
10. Kyrychenko Ye. Doslidzhennia protsesiv zaimannia ta rozvytku horinnia dvokomponentnykh pirotekhnichnykh sumishei z poroshkiv mahniuu, aliuminiuu ta oksydiv metaliv pry pidvyshchennykh temperaturakh nahrivu ta zovnishnikh tyskakh. Nadzvychaini sytuatsii: poperedzhennia ta likvidatsiia. 2022. Tom 6. № 1. S. 29–42.
11. Kyrychenko O. V., Motrichuk R. B., Dibrova O. S., Melnyk V. P., Vashchenko V. A., Butenko T. I. Doslidzhennia spalakhuvannia ta horinnia chastynok metalevoho palnogo u produktakh rozkladannia nitratovmisnykh oksysniuvachiv ta orhanichnykh rehovyn pry zovnishnikh termichnykh vplyvakh. Zbirnyk naukovykh prats “Problemy pozhezhoi bezpeky”. 2020. № 47. S. 50–59.
12. Kyrychenko O. V. Kerovana baza danykh po chasam zghorannia chastynok metalevykh palnykh v produktakh rozkladannia pirotekhnichnykh sumishei /

O. V. Kyrychenko, V. A. Vashenko ta in. // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2012. – № 4. – S. 78 – 83.

13. Kyrychenko O. V. Kerovana baza danykh po chasam zghorannia chastynok metalevykh palnykh v produktakh termichnoho rozkladannia pirotekhnichnykh nitratno- metalevykh sumishei / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashenko, V. M. Tupytskyi // Materialy 14 Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii riaduvanykiv, 26 veresnia 2012 r., m. Kyiv. – Kyiv: Instytut derzhavnoho upravlinnia u sferi tsyvilnoho zakhystu MNS Ukrainy, 2012. – S. 213 – 216.

14. Kyrychenko O. V. Doslidzhennia spalakhuvannia ta horinnia chastynok aliuminiievo-mahniievykh splaviv u produktakh rozkladannia tverdykh pirotekhnichnykh palyv / O. V. Kyrychenko, O. S. Dibrova, R. B. Motrichuk, V. A. Vashchenko, S. O. Kolinko // Naukovyi visnyk “Tsyvilnyi zakhyst ta pozhezhna bezpeka”, 2019. – № 2(8) (ISSN 2518-1777). – №2 (8). – С. 81 – 85.

15. Kyrychenko O. V. Shvydkist ta mezhi horinnia pirotekhnichnykh nitratno-mahniievykh sumishei v umovakh zovnishnikh termovplyviv / Kyrychenko O. V., Vashchenko V. A., Tsybulin V. V., Tupytskyi V. M. // Problemy pozhezhnoi bezpeky. – Kharkiv: NUTsZU, 2013. – № 34. – s. 73 – 95.

16. Kyrychenko O. V. Termichne rozkladannia dobavok orhanichnykh rehovyn v pirotekhnichnykh sumishakh v umovakh zovnishnikh termovplyviv / O. V. Kyrychenko, V. A. Vashchenko, V. V. Tsybulin // Visnyk Cherkaskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu, 2011. – № 4. – S. 116 – 120.

17. Kyrychenko O. V. Termichne rozkladannia npratovmisnykh oksyliuvachiv pirotekhnichnykh sumishei v umovakh zovnishnikh termovplyviv / O. V. Kyrychenko // Naukovyi visnyk UkrNDIPB, 2012. – № 1(25). – S. 126 – 136.

Nazarii KOZIAR¹, PhD in technical sciences (ORCID: 0000-0001-9082-0771),

Oksana KYRYCHENKO², doctor of technical sciences, professor (ORCID: 0000-0002-0240-1807),

Viktoriiia KOVBASA²(ORCID:0000-0002-9479-669X),

Viacheslav VASHCHENKO³, doctor of technical sciences, professor (ORCID: 0000-0003-0722-9353),

Mariia Kutsenko¹, PhD in economics sciences, dotsent, (ORCID:0000-0001-6879-9187),

Ievgenii SHKOLIAR², PhD in psychological sciences (ORCID:0000-0002-7304-1677),

Ihor NOZHKO², PhD in pedagogic sciences (ORCID: 0000-0003-1554-0088),

¹National University of Civil Defense of Ukraine,

²Cherkasy Institute of Fire Safety Named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Defense of Ukraine,

³Cherkasy State Technological University

DETERMINATION OF IGNITION PROCESSES OF METAL FUEL PARTICLES IN THE DECOMPOSITION PRODUCTS OF PYROTECHNIC MULTICOMPONENT NITRATE-METALLIZED MIXTURES

The results of experimental studies of the process of ignition of magnesium in gaseous products of thermal decomposition of nitrate-containing oxidizers (nitrates of alkali and alkaline earth metals), additives of organic and inorganic substances that are part of pyrotechnic multi-component nitrate-metallized mixtures, which precede the process of development of combustion of mixtures under conditions of external thermal actions are presented.

To prevent premature fire-explosive destruction of products under conditions of external thermal effects, it is necessary, first of all, to have data on the patterns of the ignition process of metal fuel particles in gaseous products of thermal decomposition of oxidants and additives of organic and inorganic substances, which precedes the process of explosive development of combustion of mixtures under the specified conditions.

In this paper, it was established that at ambient temperatures above the limiting T_3 , vapor-phase ignition was always preceded by surface ignition of conglomerates.

When studying the effect of alloying elements (Ni, Bi, Zn, Ag, Cu, Sn, Pb, Sb, In, Al) on the ignition temperature of solid magnesium in dry oxygen, it was established that the addition of all these metals to a concentration of several percent causes a decrease in temperature ignition. For example, aluminum lowers the ignition temperature from 896 K for pure Mg to 776 K with an aluminum content of 18% (oxygen pressure is 1.013·10⁵ Pa).

Based on these experiments, it was concluded that the value of the ignition temperature of magnesium alloys is inversely proportional to the linear rate of oxidation.

The propensity of magnesium to ignite sharply decreases in the presence of 0.5% silicon fluoride in the atmosphere. At the same time, the presence in the air of 1...0.3% of silicon fluoride or sulfur dioxide and 1...0.2% of boron fluoride not only prevents magnesium from igniting, but also stops its burning.

Key words: *pyrotechnic mixtures, metal fuels, nitrate-containing oxidizers, organic and inorganic substances, ignition and burning processes.*