

УДК 614.841:536.46

## ДОСЛІДЖЕННЯ СПАЛАХУВАННЯ ТА ГОРІННЯ ЧАСТИНОК АЛЮМІНІЄВО-МАГНІЄВИХ СПЛАВІВ У ПРОДУКТАХ РОЗКЛАДАННЯ ТВЕРДИХ ПІРОТЕХНІЧНИХ ПАЛИВ

О.В. Кириченко<sup>1</sup>, д-р техн.наук, с.н.с., О.С. Діброва<sup>1</sup>, Р.Б. Мотричук<sup>1\*</sup>, В.А. Ващенко<sup>2</sup>, д-р техн.наук, професор, С.О. Колінько<sup>2</sup>, канд. фіз.-мат. наук, доцент

<sup>1</sup>Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля Національного університету цивільного захисту України

<sup>2</sup>Черкаський державний технологічний університет

### ІНФОРМАЦІЯ ПРО СТАТТЮ

Надійшла до редакції: 18.11.2019

Пройшла рецензування: 16.12.2019

### КЛЮЧОВІ СЛОВА:

порошки алюмінієво-магнієвих сплавів, АМС, перхлорат амонію, ПХА, термічне розкладання, пожежовибухонебезпека.

### АНОТАЦІЯ

Представлено результати експериментальних досліджень процесів спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у газоподібних продувах високотемпературного розкладання твердих піротехнічних палив, що призводять до їх пожежовибухонебезпечного розвитку. Актуальність проведених досліджень обумовлена широкою галуззю застосування піротехнічних виробів на основі піротехнічних сумішей порошків алюмінієво-магнієвих сплавів з добавками органічних речовин, зокрема застосуванням в військовій техніці та застосуванням в різноманітних галузях пов'язаних з обертанням твердих піротехнічних палив, освітлювальних та сигнальних засобів тощо. Відповідно при пожежі на об'єктах зберігання піротехнічних виробів або під час їх транспортування виникає небезпека спалахування піротехнічних сумішей з різним прискоренням подальшого процесу їх згорання та відбувається руйнування піротехнічних виробів. Внаслідок цього утворюються високотемпературні продукти згорання, які є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів.

Відповідно до вищезазначеного необхідним є отримання даних про закономірності процесу спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів, що визначає можливість прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей. В результаті проведених досліджень були отримані дані щодо спалахування та горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів, зокрема отримано залежність часу затримки спалахування частинок алюмінієво-магнієвих сплавів від їх хімічного складу, отримано дані по процесу горіння частинок алюмінієво-магнієвих сплавів, отримано дані по впливу добавок до алюмінієво-магнієвих сплавів

**Вступ.** Нині піротехнічні суміші порошків алюмінієво-магнієвих сплавів (АМС) з перхлоратом амонію (ПХА) та добавками органічних речовин (парафіну, уротропіну та ін.) широко використовуються у різних областях військової техніки та різних галузях народного господарства (тверді піротехнічні палива, освітлювальні та сигнальні засоби тощо) [1 – 11]. В умовах вимушеного зовнішнього нагріву (наприклад, при спалахуванні складських приміщень, де зберігаються піротехнічні вироби, споряджені зарядами з розглядуваних сумішей, в умовах транспортування при інтенсивному конвективному нагріві їх поверхонь, або при ударних теплових впливах на вироби в умовах пострілу та польоту) піротехнічні суміші можуть спалахувати з різним прискоренням подальшого процесу їх згорання, руйнування виробів з утворенням високотемпературних

продуктів згорання, які є пожежонебезпечними для навколишніх об'єктів (рис. 1) [3, 6, 9, 11, 12].

Тому для прогнозування пожежонебезпечних властивостей піротехнічних сумішей у вказаних умовах необхідно, в першу чергу, мати дані про закономірності процесу спалахування та горіння частинок АМС у газоподібних продуктах термічного розкладання ПХА та органічних добавок. На даний момент окремі дані по спалахуванню та горінню частинок АМС у активних газоподібних середовищах при підвищених температурах нагріву знаходяться у багаточисельних довідниках, монографіях, наукових статтях та наукових працях [1 – 3, 6, 9, 12 – 19], що утруднює як встановлення закономірностей спалахування та горіння частинок АМС в умовах, близьких до реальних умов горіння піротехнічних сумішей,

так й оперативне їх використання в якості керованої бази даних з властивостей компонентів, які характеризують їх пожежонебезпеку в умовах різних зовнішніх термічних впливів. Тому метою даної роботи є

систематизація та аналіз експериментальних даних по спалахуванню та горінню часинок АМС у продуктах розкладання окиснювача та добавок органічних речовин, а також їх узагальнення у вигляді нових закономірностей.

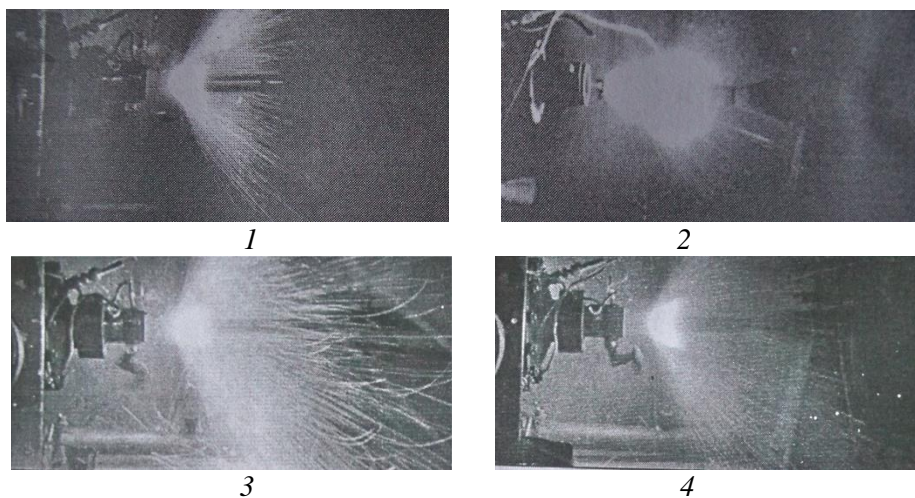


Рисунок 1 – Кінокадри зйомки загальної картини пожежовибухонебезпечних руйнувань зарядів ТПТ на основі сумішей ПХА + АМ + парафін при зовнішніх термічних впливах ( $q_n^*$  та  $\tau^*$  – критичні значення зовнішніх теплових потоків та часів їх дії, перевищення яких викликає передчасне спрацьовування зарядів ТПТ):

$$1 - q_n^* = 1,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, \tau^* = 90 \text{ с};$$

$$2 - q_n^* = 2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, \tau^* = 40 \text{ с};$$

$$3 - q_n^* = 1,7 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, \tau^* = 70 \text{ с};$$

$$4 - q_n^* = 2,5 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2, \tau^* = 30 \text{ с};$$

В результаті проведених досліджень [2, 3, 6, 9] було встановлено, що при температурах, властивих реакційній зоні піротехнічних сумішей в умовах їх спалахування та розвитку горіння, основними активними газоподібними продуктами термічного розкладання окиснювача та розглядуваних органічних речовин є  $O_2$ ,  $CN$ ,  $CH$ ,  $NO$ ,  $OH$ ,  $NH$ ,  $CHN$ . Тому нижче розглядаються результати досліджень процесів спалахування та горіння частинок АМС при підвищених температурах нагріву у вказаних газоподібних продуктах.

**Результати досліджень та їх аналіз.** Усі дослідження проводились на хімічно чистих компонентах сумішей, які випускаються піротехнічною промисловістю, з використанням наступних стандартних методів фізико-хімічного аналізу: методи кінозйомки, фотографічні методи, спектральні методи, фотоелектричні та термогравіметричні методи, оптичні методи, які ґрунтуються на інтерференції та поляризації у тонких плівках тощо [6, 9]. Дослідження зразків пресованих сумішей (використовувалось двостороннє пресування, зразки мали форму пластин розміром  $1,5 \cdot 10^{-2} \times 2 \cdot 10^{-2} \times 3 \cdot 10^{-2}$  м) проводились на стандартних установках, що випускаються піротехнічною промисловістю [2, 3, 6]. Математична обробка експериментальних

даних (кожна точка отримана як середнє значення вимірювань 8...10 частинок, розміщених у зразку) показала, що відносна похибка вимірювань знаходилась у межах 4...7 %.

В результаті досліджень було встановлено залежність часу затримки спалахування ( $\tau_{зс}$ , мс) від хімічного складу частинок сплаву (дисперсність 135 мкм) (рис.2). Спалахування частинок з малим вмістом Mg відбувається на значній відстані від поверхні горіння. Із збільшенням вмісту Mg час затримки спалахування швидко зменшується, частинки, що містять 55...65 % Mg, спалахують безпосередньо на поверхні. Займістість частинок з великим вмістом Mg дещо погіршується.

Показано, що ширина треків частинок, що горять, у 3...5 разів перевищує діаметр часинок; межі треків розмиті. Характер треків свідчить про те, що для більшості сплавів переважає горіння у паровій фазі. Із зростанням вмісту Mg ширина треків збільшується (збільшується частка парофазних реакцій або швидкість їх протікання), а час горіння зменшується. При цьому час згорання частинок може бути зменшений за рахунок "вибухового" горіння, тобто горіння з розщепленням, яке не

одноразово спостерігалось під час експериментів.

На рис. 3 видно, що частка частинок, які розщеплюються, зростає із збільшенням вмісту Mg у сплаві, наближається до одиниці при концентрації Mg у сплаві  $C_{Mg} = 57...68\%$  й далі зменшується.

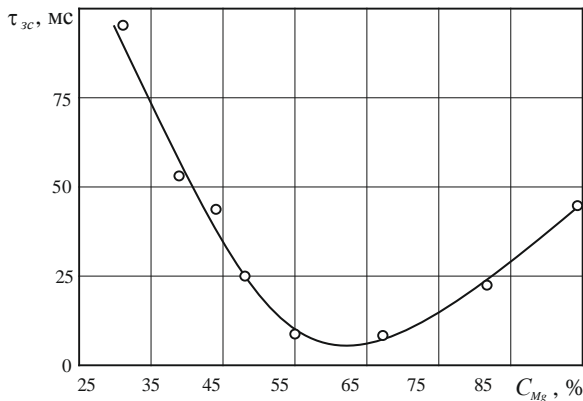


Рисунок 2 – Залежність часу затримки спалахування  $\tau_{зс}$  від вмісту Mg у частинках  $C_{Mg}$ .

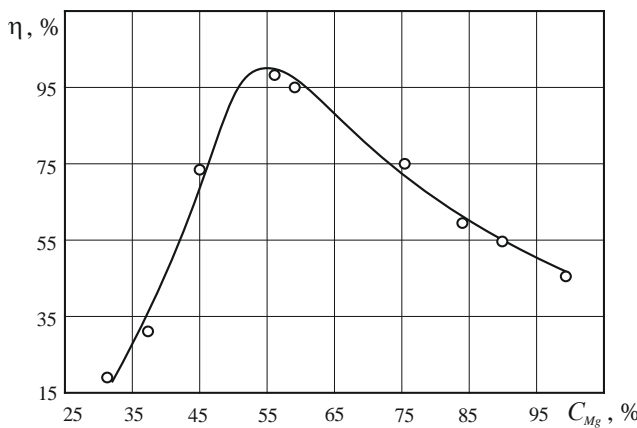


Рисунок 3 – Залежність частки частинок, що розщепилися  $\eta$ , від вмісту Mg у сплаві  $C_{Mg}$ .

При цьому крива на рис. 3, що відображає характер горіння частинок АМС, коригує з кривою рис. 2, що відображає характер їх спалахування.

Схожа залежність температури спалахування від хімічного складу отримана для частинок АМС; при цьому швидкість окиснення деяких частинок АМС та їх займистість вище, ніж у магнію, що пояснюється впливом магнію на оксидну плівку, що покриває частинки сплаву (нагадаємо, що відношення Пілінга-Бедворса для алюмінію складає 1,28...1,54, а для магнію – 0,81). Вміст Mg у оксидній плівці завжди у багато разів вище середнього вмісту Mg у сплаві Al – Mg: якщо сплав, з якого виготовлена частинка, містить більше 0,01 %

Mg, то оксидна плівка на частинці складається із суміші подвійного оксиду  $MgO \cdot Al_2O_3$  та MgO. При вмісті у сплаві більше 1 % Mg оксидна плівка на частинці цілком складається з MgO. Такий розподіл металів по об'єму частинки викликаний, у основному, високою поверхневою активністю магнію (при 923...933 К величини поверхневого натягу Al та Mg дорівнюють відповідно 0,865 Н/м та 0,559 Н/м). У рідкому стані поверхня краплі сплаву збагачується поверхнево-активним металом – магнієм. При швидкому затвердінні сплаву вирівнювання не встигає пройти, й частинка зберігає розподіл металів, який існував у рідкій фазі. Далі, оскільки летючість магнію значно перевищує летючість алюмінію (при 1273 К пружність пари Mg майже на 6 порядків вище, ніж пружність пари алюмінію), то із збільшенням вмісту Mg у сплаві відбувається прискорення хімічних реакцій у паровій фазі.

При плавленні металу всередині оксидної оболонки відбувається помітне збільшення об'єму металу (для Al – на 6,4 %, для Mg – на 4,2 %), виникають напруги, що здатні зруйнувати оксидну оболонку. Це ще більше полегшує спалахування частинок при нагріві.

Встановлено, що порушення міцності оксидної плівки та збільшення летючості сплаву, разом з підвищеною реакційною здатністю магнію, призводять до зростання швидкості горіння із збільшенням вмісту Mg аж до 80 %. Однак, при подальшому збільшенні вмісту магнію (більше 80 %) горіння частинок знову гальмується. Пояснення цього полягає у підвищенні температури плавлення сплаву та зниженні його сумарної теплоти згорання.

Добавки до АМС невеликих кількостей  $MnO_2$ , BaO,  $V_2O_5$  (до 1...2 %) зменшують період індукції частинок при нагріванні у продуктах згорання піротехнічного палива на основі ПХА. При цьому вплив цих добавок при введенні їх у склад палива більше, ніж у випадку, коли поверхня металу покривається ними. Найбільший вплив на зменшення періоду індукції має  $MnO_2$ , найменший – BaO.

**Висновки.** Систематизація та узагальнення отриманих даних по спалахуванню та горінню частинок алюмінієво-магнієвих сплавів у активних газоподібних продуктах високотемпературного розкладання твердих піротехнічних палив на основі ПХА та добавок органічних речовин (парафіну, уротропіну та ін.) ( $O_2$ , CN, CH, NO, OH, NH, CHN) показують, що:

– час затримки спалахування частинок АМС суттєво залежить від їх хімічного складу:

при малому вмісті Mg (< 30...35 %) спалахування частинок спостерігається на значній відстані від поверхні горіння; при збільшенні вмісту Mg (> 35...40 %) затримка спалахування різко зменшується, при цьому частинки, що містять до 55...65 % Mg спалахують безпосередньо на поверхні;

– процес горіння частинок АМС відбувається у паровій фазі та закінчується вибухонебезпечним розщепленням на дрібні

частинки; при ньому частка частинок, що розщеплюються, зростає із збільшенням вмісту Mg у сплаві до 50...60 % до одиниці (повне розщеплення), а потім швидко зменшується;

– добавки до АМС невеликих кількостей  $MnO_2$ ,  $BaO$ ,  $V_2O_5$  (до 1...2 %) зменшують час затримки спалахування частинок, при цьому найбільший вплив має  $MnO_2$ , а найменший –  $BaO$ .

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский. – М.: Машиностроение, 1973. – 320 с.
2. Силин Н. А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. – М.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
3. Силин Н. А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. – М.: Машиностроение, 1982. – 232 с.
4. Тарасов В. В. Инфракрасные системы “смотрящего” типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенко. – М.: Логос, 2004. – 444 с.
5. Глущенко А. Р. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. 8.

## REFERENCES

1. Shidlovskij A. A. Osnovy pirotehniki / A. A. Shidlovskij. – М.: Mashinostroenie, 1973. – 320 s.
2. Silin N. A. Metallicheskie gorjuchie geterogennyh kondensirovannyh sistem / N. A. Silin, V. A. Vashhenko, L. Ja. Kashporov i dr. – М.: Mashinostroenie, 1976. – 320 s.
3. Silin N. A. Gorenje metallizirovannyh geterogennyh kondensirovannyh sistem / N. A. Silin, V. A. Vashhenko, L. Ja. Kashporov i dr. – М.: Mashinostroenie, 1982. – 232 s.
4. Tarasov V. V. Infkrasnye sistemy “smotrajshhego” tipa / V. V. Tarasov, Ju. G. Jakushenkov. – М.: Logos, 2004. – 444 s.
5. Glushhenko A. R. Tankovyje nochnye sistemy i pribory nabljudenija / A. R. Glushhenko, V. I. Gordienko, A. V. Burak, A. Ju. Denisenko. – Cherkassy: Fotopribor, 2007. – 441 s.

6. Ващенко В. А. Процессы горения металлизированных конденсированных систем / В. А. Ващенко, О. В. Кириченко, Ю. Г. Лега, П. И. Заика, И. В. Яценко, В. В. Цыбулин. – К.: Наукова думка, 2008. – 745 с.
7. Кириченко О. В. Термодинамічні методи прогнозування пожежонебезпечних властивостей високометалізованих піротехнічних нітратно-металічних сумішей в умовах зовнішніх термовпливів / О. В. Кириченко, В. Д. Акіншин, В. А. Ващенко, В. В. Цибулін // Проблеми пожежної безпеки. – Харків: НУГУ, 2011. – № 30. – с. 104 – 106.

6. Vashhenko V. A. Processy gorenija metallizirovannyh kondensirovannyh sistem / V. A. Vashhenko, O. V. Kirichenko, Ju. G. Lega, P. I. Zaika, I. V. Jacenko, V. V. Cybulin. – К.: Naukova dumka, 2008. – 745 s.
7. Kirichenko O. V. Termodinamichni metodi prognozuvannja pozhezhonebezpečnih vlastivostej visokometalizovanih pirotehnichnih nitratno-metalichnih sumishej v umovah zovnishnih termovpliviv / O. V. Kirichenko, V. D. Akin'shin, V. A. Vashhenko, V. V. Cibulin // Problemy pozhamoj bezopasnosti. – Har'kov: NUGU, 2011. – № 30. – с. 104 – 106.

## THE RESEARCH OF IGNITION AND COMBUSTION OF ALUMINUM AND MAGNESIUM ALLOYS IN THE PRODUCTS OF DECOMPOSITION OF SOLID PYROTECHNICAL FUELS

*O. Kyrychenko<sup>1</sup>, Doct. of Sc. (Eng.), Senior Fellow, O. Dibrova<sup>1</sup>, R. Motrichuk<sup>1</sup>, V. Vashchenko<sup>2</sup>, Doct. of Sc. (Eng.), Prof., S. Kolinko<sup>2</sup>, Doct. of Sc. (Physics and Mathematics), Assoc. Prof.*

<sup>1</sup>*Cherkassy Institute of Fire Safety named after Chernobyl Heroes of National University of Civil Protection of Ukraine*

<sup>2</sup>*Cherkasy State Technological University*

### KEYWORDS

aluminum and magnesium alloy powders, AMA, ammonium perchlorate, PCA, thermal decomposition, fire explosion hazard.

### ANNOTATION

The results of experimental research of processes of ignition and combustion of particles of aluminum and magnesium alloys in gaseous purges of high-temperature decomposition of solid pyrotechnic fuels leading to their fire explosive hazardous development are presented. The relevance of these research is due to the wide scope of application of pyrotechnic products based on pyrotechnic mixtures of powders of aluminum-magnesium alloys with additives of organic substances, in particular applications in military technology and use in various industries related to the rotation of solid pyrotechnic equipment. Accordingly, in case of fire at facilities where pyrotechnic products are kept or during their transportation there exists the risk of ignition of pyrotechnic mixtures with different acceleration of their subsequent combustion process and destruction of the pyrotechnic products. As a result, high-temperature combustion products are formed, which are fire hazardous to the surrounding environment.

Based on the foregoing, it is necessary to obtain data on the regularities of ignition and combustion particles of aluminum-magnesium alloys, which determines the ability to predict the properties of fire hazard pyrotechnic mixtures. As a result of conducted research, data on the ignition and combustion of particles of aluminum-magnesium alloys was obtained, in particular, the dependence of the delay time of the particles of aluminum-magnesium alloys on their chemical composition was obtained, the data on the process of combustion of particles of aluminum-magnesium alloys was obtained, the data on the effect of additives to aluminum-magnesium alloys was obtained.

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ ЧАСТИЦ АЛЮМИНИЕВО-МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ПРОДУКТАХ РАЗЛОЖЕНИЯ ТВЕРДЫХ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ ТОПЛИВ

*О.В. Кириченко<sup>1</sup>, д-р техн.наук, с.н.с., О.С. Диброва<sup>1</sup>, Р.Б. Мотричук<sup>1\*</sup>, В.А. Ващенко<sup>2</sup>, д-р техн.наук, профессор, С.О. Колинко<sup>2</sup>, канд. физ.-мат. наук, доцент*

<sup>1</sup>*Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля Национального университета гражданской защиты Украины*

<sup>2</sup>*Черкасский государственный технологический университет*

### КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

порошки алюминий-магниевого сплава, АМС, перхлорат аммония, пха, термическое разложение, пожаровзрывоопасность.

### АННОТАЦИЯ

Представлены результаты экспериментальных исследований процессов воспламенения и горения частиц алюминий-магниевого сплава в газообразных продуктах высокотемпературного разложения твердых пиротехнических топлив, приводящие к пожаровзрывоопасному развитию горения. Актуальность проведенных исследований обусловлена широкой областью применения пиротехнических изделий на основе смесей порошков алюминий-магниевого сплава с добавками органических веществ, в частности применением их в военной технике, в осветительных и сигнальных средствах и т.п. Соответственно при пожаре на объектах хранения пиротехнических изделий или во время их транспортировки возникает опасность возгорания пиротехнических смесей в результате которого образуются высокотемпературные продукты сгорания, которые являются источниками воспламенения для окружающих объектов.

Необходимо получение данных о закономерности процесса воспламенения и горения частиц алюминий-магниевого сплава, что определяет возможность прогнозирования пожароопасных свойств пиротехнических смесей. В результате проведенных исследований были получены данные по возгоранию и горению частиц алюминий-магниевого сплава, в частности получена зависимость времени задержки воспламенения частиц алюминий-магниевого сплава от их химического состава, получены данные по процессу горения частиц алюминий-магниевого сплава, а также по влиянию на горение добавок к алюминий-магниевого сплава.