Технічні науки

УДК 614.841:536.46

Діброва Олексій Сергійович
ад'юнкт
Національний університет цивільного захисту України
Диброва Алексей Сергеевич
адъюнкт
Национальный университет гражданской защиты Украины
Dibrova Oleksiy
Adjunct
National University of Civil Defence of Ukraine

Кириченко Оксана В'ячеславівна
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри пожежно-профілактичної роботи
Черкаський інститут пожежної безпеки імені Героїв Чорнобиля
Національного університету цивільного захисту України
Кириченко Оксана Вячеславовна
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой пожарно-профилактической работы
Черкасский институт пожарной безопасности имени Героев Чернобыля
Национального университета гражданской защиты Украины
Kyrychenko Oksana
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Department Department of Fire Prevention Work
Cherkasy Institute of Fire Safety named after Chornobyl Heroes of
National University of Civil Defense of Ukraine

Мотрічук Роман Борисович
ад'юнкт
Управління Державної служби України
з надзвичайних ситуацій у Черкаській області
Мотричук Роман Борисович
адъюнкт
Управление Государственной службы Украины
по чрезвычайным ситуациям в Черкасской области
Motrichuk Roman
Adjunct
Department of the State Emergency Service of
Ukraine in the Cherkasy Region

Ващенко Вячеслав Андрійович
доктор технічних наук, професор,
завідувач кафедри фізики та прикладного матеріалознавства
Черкаський державний технологічний університет
Ващенко Вячеслав Андреевич
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой физики и прикладного материаловедения
Черкасский государственный технологический университет
Vashchenko Vyacheslav
Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of the Department of Physics and Applied Materials Science
Cherkasy State Technological University

ЗАКОНОМІРНОСТІ ВПЛИВУ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ПОЖЕЖНУ БЕЗПЕКУ ПІРОТЕХНІЧНИХ НІТРАТНО-ТИТАНОВИХ СУМІШЕЙ В УМОВАХ ЗОВНІШНІХ ТЕРМІЧНИХ ДІЙ

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ НА ПОЖАРНУЮ БЕЗОПАСНОСТЬ ПИРОТЕХНИЧЕСКИХ НИТРАТНОГО-ТИТАНОВЫХ СМЕСЕЙ В УСЛОВИЯХ ВНЕШНИХ ТЕРМИЧЕСКИМ ВОЗДЕЙСТВИЙ

REGULARITIES OF THE EFFECT OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS ON FIRE SAFETY OF PYROTECHNICAL NITRATE-TITANIUM MIXTURES IN EXTERNAL THERMAL CONDITIONS

Анотація. *На стадії проектування піротехнічних виробів на основі ущільнених нітратно-титанових сумішей необхідно прогнозувати критичні режими їх нагріву, перевищення яких призводить до поверхневого руйнування зарядів сумішей, в результаті відбувається їх вибухонебезпечне спрацьовування в умовах експлуатації. Розроблено уточненні математичні моделі нагріву зарядів сумішей, що враховують температурні залежності теплофізичних властивостей сумішей (об'ємної теплоємності, коефіцієнта теплопровідності), та дозволяють більш точно розраховувати розподіли температур та термопружних напружень по товщині заряду. Вперше встановлено критичні значення параметрів зовнішніх термічних дій (теплових потоків, часів їх дії), зіставлення яких з отриманими експериментальними даними показало їх збіг з відносною похибкою 8…10 %.*

Ключові слова: *піротехнічні нітратно-металеві суміші, параметри термовпливу, температурні поля, термопружні напруження.*

Аннотация. *На стадии проектирования пиротехнических изделий на основе уплотненных нитратно-титановых смесей необходимо прогнозировать критические режимы их нагрева, превышение которых приводит к поверхностному разрушению зарядов смесей, в результате происходит их взрывоопасное срабатывания в условиях эксплуатации. Разработан уточнении математические модели нагрева зарядов смесей*

учитывают температурные зависимости теплофизических свойств смесей (объемной теплоемкости, коэффициента теплопроводности), и позволяют более точно рассчитывать распределения температур и термоупругих напряжений по толщине заряда.

Впервые установлено критические значения параметров внешних термических воздействий (тепловых потоков, время их действия), сопоставление которых с полученными экспериментальными данным показало их совпадение с относительной погрешностью 8 ... 10%.

Ключевые слова: *пиротехнические нитратно-металлические смеси, параметры термовпливу, температурные поля, термоупругих напряжения.*

Summary. *At the stage of designing pyrotechnic articles on the basis of compacted nitrate-titanium mixtures it is necessary to predict the critical modes of their heating, the excess of which leads to the surface destruction of the charges of the mixtures, as a result of which there is an explosive operation in operating conditions. Refined mathematical models of heating charge mixtures, taking into account the temperature dependences of the thermophysical properties of mixtures (volumetric heat capacity, coefficient of thermal conductivity), and allow to more accurately calculate the distribution of temperatures and thermal-elastic stresses on the charge thickness. For the first time, the critical values of the parameters of external thermal actions (heat fluxes, their time of action) were established, which comparison with the obtained experimental data showed their coincidence with a relative error of 8… 10%.*

Key words: *pyrotechnic nitrate-metal mixtures, parameters of thermal influence, temperature fields, thermoelastic stresses.*

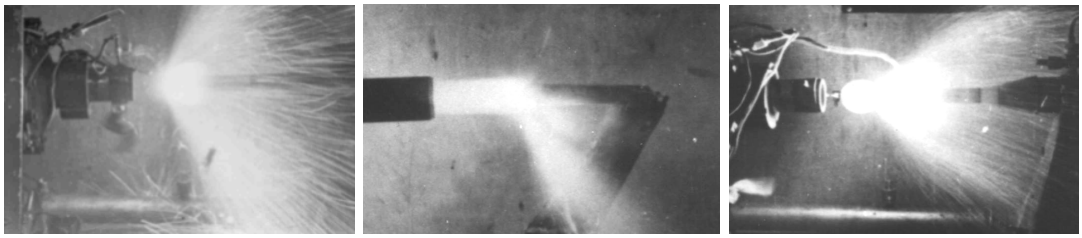
Вступ. Піротехнічні вироби на основі ущільнених сумішей з порошків металевих пальних (магнію, алюмінію, титану та ін.) та нітратовмісних

окиснювачів (нітратів лужних, лужноземельних металів та ін.) широко використовуються в різних галузях народного господарства та військової техніки (освітлювальні сигнальні та трасувальні засоби, тверді палива для ракетно-космічної техніки, помилкові теплові цілі та ін. [1 – 5]). При обігу виробів (зберігання, транспортування та застосування) вони можуть піддаватись зовнішнім термічним впливам (наприклад, при пожежі у складських приміщеннях, де зберігаються вироби, або при їх транспортуванні, в умовах пострілу та польоту та ін.) [6 – 18].

В результаті відбувається суттєвий нагрів зарядів сумішей, що призводить до їх руйнувань (утворення тріщин, відшарувань та ін.), які призводять до зменшення міцності зарядів, а також до вибухонебезпечного розвитку їх займання та горіння (рис. 1).

Тому на стадії проектування та розробки піротехнічних сумішей необхідно вміти визначати критичні значення параметрів зовнішніх термодій (теплових потоків, часів їх дії та ін.), перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечних для оточуючих об'єктів руйнувань зарядів сумішей.

Нині вказана задача не вирішена, оскільки відсутні результати досліджень з моделювання та розрахунку розподілів термопружних напружень у зарядах сумішей різних розмірів та геометричної форми (плоскі пластини, циліндричні та півсферичні елементи та ін.) в умовах зовнішніх термічних дій, а також дані про залежності гранично допустимих термопружних напружень у зарядах сумішей від температури нагріву. Тому **метою даної роботи** є побудова математичних моделей термопружних напружень у зарядах піротехнічних нітратно-титанових сумішей (ущільнені суміші Ti + $NaNO_3$) при дії зовнішніх джерел тепла, розробка методів визначення критичних діапазонів зміни їх параметрів, а також перевірка адекватності моделей шляхом порівняння з результатами отриманих експериментальних даних.



а) б) в)

Рис. 1. Кінокадри загальної картини вимушених пожежонебезпечних руйнувань виробів на основі ущільнених нітратно-титанових сумішей в умовах зовнішніх термодій на їх поверхні

(зйомка здійснювалась кінокамерою "Конвас-автомат" зі швидкістю 30 кадр/с, а нагрів виробів – кварцовими лампами типу КГМ-220-1000-1 із застосуванням керованих термодатчиків РИФ-101 для контролю температури на поверхні виробів в діапазоні 300…1900 К [3; 5; 7]: а) – суміші з надлишком металевого пального; б) – стехіометричні суміші; в) – суміші з надлишком окиснювача

Результати розрахунків та їх аналіз. Для дослідження використовувались зразки пресованих сумішей з порошків титана та нітратів нагрію і барію, що випускаються піротехнічною промисловістю [1; 2; 5; 19; 20]. Розглядались широко використовувані на практиці зразки сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоскі пластини, циліндричні елементи) з максимальним коефіцієнтом ущільнення $K_У$ = 0,9…0,95. Для вимірювання температури поверхні зразків сумішей $T_п$ використовувались стандартні термопари ТПП-0679-01 та ТПР-0679-01 [2; 5; 7], відносна похибка вимірювання температури не перевищує 1…2 %. Критичні значення термопружних напружень у зразках сумішей в залежності від температури нагріву $\sigma^*(T)$ вимірювались на стандартному піротехнічному обладнанні (відносна похибка не перевищувала 5…7 % [1; 2; 5; 7].

Математична модель процесу нагрівання плоского зразка суміші зовнішнім тепловим потоком. При зовнішній тепловій дії на поверхню зразка поступає рівномірно розподілений тепловий потік $q_n(t)$ (рис. 2). При цьому розглядається зразок, для якого $\frac{\partial T}{\partial x}=\frac{\partial T}{\partial y}=0$ (одномірність розподілу тепла углиб зразка), а також глибина зони термодії $\delta \approx H$ ($\delta=2\cdot\sqrt{a^2\cdot\tau}$, де a^2 – коефіцієнт температуропровідності суміші (м^2/с); τ – час зовнішньої теплової дії, с), тобто враховується теплообмін на нижньому боці зразка. Також вважається, що тепловтрати за рахунок випромінювання знехтувано малі (внаслідок малих значень температури поверхні зразка (не більше 1000…1500 К [5; 7])).

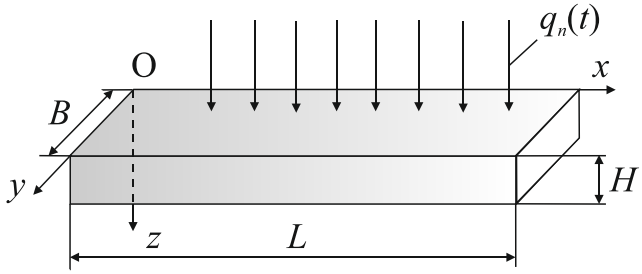


Рис. 2. Схема нагрівання плоского зразка зовнішньою тепловою дією:

B, H, L – ширина, товщина та довжина пластини, м; $B < L$, $H < B$; $q_n(t)$ – зовнішній тепловий потік, Вт/м^2

Таким чином, розглядається така одномірна, нестаціонарна та нелінійна математична модель поверхневого нагріву зразка [21]:

$$C_V(T(z,t))\cdot\frac{\partial T(z,t)}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial z}(\lambda(T(z,t))\cdot\frac{\partial T(z,t))}{\partial z}),\ 0<z<H,\ t>0, \quad (1)$$

$$T(z,t)|_{t=0}=T_0, \quad (2)$$

$$\lambda(T(z,t))\cdot\frac{\partial T(z,t)}{\partial z}|_{z=H}=q_n(t), \quad (3)$$

$$\lambda(T(z,t))\cdot\frac{\partial T(z,t)}{\partial z}|_{z=0}=0, \quad (4)$$

де $T(z,t)$ – температура в різних точках z по товщині зразка в різні моменти часу t, T_0 – початкова температура зразка, К.

Для знаходження розв'язку задачі (1) – (4) врахуємо залежності $C_V(T)$ і $\lambda(T)$ [5; 7]:

$$C_V(T) = C_{V0} \cdot T^{\nu},\ \lambda(T) = \lambda_0 \cdot T^{\nu}, \tag{5}$$

де C_{V0}, λ_0, ν – емпіричні константи. Далі лінеаризуємо систему рівнянь (1) – (4) за допомого заміни змінної:

$$\theta(z,t)=T(z,t)^{\nu+1}-T_0^{\nu+1}, \tag{6}$$

а потім, використовуючи стандартне косинус-перетворення Фур'є [21] для отриманої системи рівнянь відносно $\theta(z, t)$, отримуємо для $q_n = const$ наступний вираз:

$$\theta(z,t)=q_n \cdot [\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^n \cdot \frac{\cos\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} + 2H \cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{\pi^2 \cdot n^2} \cdot e^{-(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H})^2 \cdot t}]. \tag{7}$$

Враховуючи (5), остаточно, отримуємо

$$T(z,t)=\{T_0^{\nu+1} + \frac{(\nu+1) \cdot q_n}{\lambda_0} \cdot [\frac{a_0^2 \cdot t}{H} + \frac{3z^2-H^2}{6H} + \frac{2H}{\pi^2} \cdot$$

$$\cdot \sum_{n=1}^{\infty} (-1)^{n+1} \cdot \frac{\cos\frac{\pi \cdot n \cdot z}{H}}{n^2} \cdot e^{-(\frac{\pi \cdot a_0 \cdot n}{H})^2 \cdot t}]\}^{\frac{1}{\nu+1}}. \tag{8}$$

Враховуючи, що нестаціонарне температурне поле у зразку товщиною H: $T(z,t)$, де $z \in [0,H]$, тобто температурне поле в пластині змінюється лише по його товщині. При цьому, як показано у роботах [22; 23], для необмеженого, вільного від поверхневих сил зразка з вільними від закріплення кінцями, компоненти тензора напружень мають вигляд:

$$\sigma_{zy}=\sigma_{zz}=\sigma_{xy}=\sigma_{xz}=0,\ \sigma_{yy}=\sigma_{xx}=\sigma(z,t)=\frac{\alpha_T \cdot E}{1-\bar{\nu}} \cdot$$

$$\cdot(-T(z,t)+\frac{2}{H^2} \cdot (2H-3z) \cdot \int_0^H T(z,t)dz - \frac{6}{H^3} \cdot (H-2z) \cdot \int_0^H z \cdot T(z,t)dz), \tag{9}$$

де α_T, E – термічний коефіцієнт лінійного розширення та модуль Юнга відповідно.

Математична модель процесу нагрівання циліндричного зразка суміші зовнішнім тепловим потоком.

Циліндричний зразок. Розглядаються суцільні протяжні циліндричні зразки радіуса R ($R<<D$ – довжина циліндричного зразка) з суміші (рис. 3).

Для значень R, які використовуються на практиці (R = 5…15·10^{-3} м), виконується умова $R>>\delta=2\sqrt{a_0^2\cdot\tau}$, тобто глибина проникнення теплової хвилі у зразок набагато менше його радіуса. Тоді цей зразок можна розглядати як необмежений циліндр, бокова поверхня якого нагрівається тепловим потоком $q_n(t)$. Вважається, що здійснюється рівномірний нагрів поверхні зразка, тоді $\frac{\partial T}{\partial \varphi}=\frac{\partial T}{\partial z}\approx 0$. При цьому тепловіддача за рахунок конвекції та радіації не враховується.

Рівняння математичної моделі розповсюдження тепла у необмеженому циліндричному зразку мають вигляд [21]:

$$C_V(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial r}[\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial r}]+\frac{1}{r}\cdot\frac{\partial}{\partial r}[\lambda(T)\cdot T],\ \ t>0,\ t>0, \tag{10}$$

$$T|_{t=0}=T_0, \tag{11}$$

$$\lambda(T)\cdot\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=R}=q_n(t), \tag{12}$$

$$\frac{\partial T}{\partial r}|_{r=0}=0,\quad T|_{r=0}\neq\infty, \tag{13}$$

де $T(r,t)$ – поточна температура в залежності від радіуса та часу.

З врахуванням $C_V(T)$ та $\lambda(T)$ (див. (5)), заміни змінної (6), а також з використанням відомих методів інтегральних перетворень (перетворення Лапласа по змінній r [21]) та з врахуванням співвідношення $q_n(t)$ = *const*, отримуємо розв'язок системи (1) – (4) у вигляді:

$$T(r,t)=\{T_0^{\nu+1}+\frac{(\nu+1)\cdot q_n\cdot R}{\lambda_0}\cdot$$

$$\cdot[\frac{2a_0^2\cdot t}{R^2}-\frac{1}{4}\cdot(1-2\cdot\frac{r^2}{R^2})-\sum_{n=1}^{\infty}\frac{2\cdot I_0(\mu_n\cdot\frac{r}{R})}{\mu_n^2\cdot I_0(\mu_n)}\cdot e^{-(\frac{\mu_n\cdot a_0}{R})^2\cdot t}]\}^{\frac{1}{\nu+1}}, \tag{14}$$

Ряд у виразі (14) достатньо швидко сходиться, тому для практичних розрахунків обмежуються декількома членами ряду (звичайно у межах 5 або 6). Для проведення розрахунків функції Беселя $I_0(\mu_n)$, $I_0\left(\mu_n\cdot\frac{r}{R}\right)$ з високим ступенем точності (відносна похибка не перевищує 10^{-5} %) апроксимуються поліномами [21].

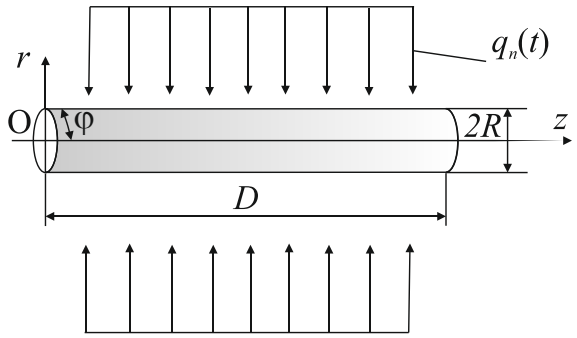


Рис. 3. Схема нагрівання циліндричного зразка зовнішньою тепловою дією: R, D – радіус та довжина елемента, м; $q_n(t)$ – поверхнева густина теплового впливу, Вт/м^2; r, z, φ – циліндричні координати

Далі розглядається випадок вісесиметричного температурного поля $T(r,t)$ (наприклад, рівномірна теплова дія на бокову поверхню циліндричного зразка, який часто зустрічається на практиці [2, 5, 7]); в цьому випадку термонапружений стан елемента також буде вісесиметричним, тобто усі похідні по φ у системі рівнянь термопружності дорівнюють нулю. Крім того, за рахунок симетрії переміщення $u_\varphi = 0$. Тоді для вільного від зусиль на кінцях зразка температурне переміщення u_z лінійно залежить від z та виражається наступною формулою [22]:

$$u_z = \frac{2\alpha_T \cdot z}{R_w^2} \cdot \int_0^{R_w} r \cdot T dr \qquad (15)$$

та від радіуса r не залежить, оскільки перетини, перпендикулярні вісі Oz залишаються плоскими.

Для визначення переміщення u_r з системи рівнянь термопружності [23] маємо тільки одне рівняння:

$$\frac{d}{dr}\left(\frac{1}{r} \cdot \frac{d(r \cdot u_r)}{dr}\right) - \alpha_T \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \cdot \frac{\partial T}{\partial r} = 0. \qquad (16)$$

Розв'язуючи рівняння (16), знаходимо компоненти напружень:

$$\sigma_{r\varphi} = \sigma_{\varphi z} = \sigma_{zr} = 0,$$

$$\sigma_{rr} = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(\frac{1}{R_w^2} \cdot \int_0^{R_w} r \cdot T dr - \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r r \cdot T dr\right),$$

$$\sigma_{\varphi\varphi} = \frac{\alpha_T \cdot E}{1-\nu} \cdot \left(-T + \frac{1}{R_w^2} \cdot \int_0^{R_w} r \cdot T dr + \frac{1}{r^2} \cdot \int_0^r r \cdot T dr\right),$$

$$\sigma_{zz}=\frac{\alpha_T \cdot E}{1\text{-}\nu}\cdot(-T+\frac{2}{R_w^2}\cdot\int_0^{R_w} r\cdot T dr). \quad (17)$$

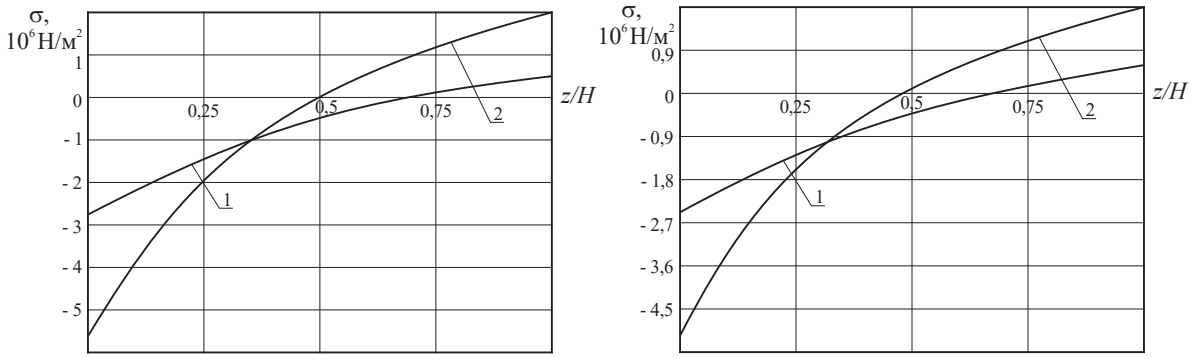
Визначення пожежонебезпечних руйнувань зразків сумішей при перевищенні меж міцності, передчасного загоряння та переходу до вибухового горіння. Отримані формули (8), (9), (14), (17) дозволяють за допомогою відомих фізико-механічних характеристик сумішей [2; 7; 19; 20], а також стандартних пакетів прикладних програм [24], проводити розрахунки в діалоговому режимі та режимі реального часу на сучасних ПК розподілів термопружних напружень у поверхневих шарах широкого класу зразків піротехнічних сумішей різної геометричної форми та розмірів в залежності від основних параметрів зовнішніх термодій (величини теплового потоку q_n та часу його дії t), а також визначати їх критичні значення q_n^* та t^*, перевищення яких призводить до пожежовибухонебезпечних руйнувань пускових установок та навколишніх об'єктів, травмування та загибелі обслуговуючого персоналу.

Плоский зразок. В результаті проведених розрахунків (рис. 4 – 6) було встановлено, що по товщині зразка термічні напруження істотно нерівномірні: поблизу її поверхні мають місце стискаючі напруження ($\sigma < 0$, $|\sigma|_{max} = 4{,}9\cdot10^6...5{,}2\cdot10^6$ Н/м^2 – для Ti + $NaNO_3$ та $|\sigma|_{max} = 1{,}8\cdot10^6...\ 3{,}4\cdot10^6$ Н/м^2 – для Ti + $Ba(NO_3)_2$), а на нижньому боці – розтяжні напруження ($\sigma > 0$, $|\sigma|_{max} = 1{,}3\cdot10^6...1{,}7\cdot10^6$ Н/м^2 – для Ti + $NaNO_3$ та $|\sigma|_{max} = 0{,}5\cdot10^6...1{,}3\cdot10^6$ Н/м^2 – для Ti + $Ba(NO_3)_2$). При цьому ступінь впливу параметрів зовнішніх термодій наступний: збільшення часу теплової дії від t = 3 с до t = 15 с призводить до зростання $|\sigma|_{max}$ у 1,9…4,1 разу – для Ti + $NaNO_3$ та у 1,6…3,8 разу – для Ti + $Ba(NO_3)_2$.

Циліндричний зразок. З результатів проведених розрахунків, представлених на рис. 7 – 9, випливає, що при зовнішньому нагріві елемента термічні напруження, за виключенням радіальних компонент, досягають найбільшого значення стискання з боку нагріву (при збільшенні

зовнішнього теплового потоку q_n від $1{,}5\cdot10^5$ Вт/м^2 до $2{,}3\cdot10^6$ Вт/м^2 значення $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ зростають у 1,3…1,5 разу для Ti + $NaNO_3$, а для Ti + $Ba(NO_3)_2$ – у 1,7…2,3 разу). При цьому збільшення часу зовнішньої теплової дії t від 0,3 с до 1,5 с (для Ti + $NaNO_3$) та від 2 с до 15 с (для Ti + $Ba(NO_3)_2$) призводить до зростання величин $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ відповідно у 1,9…2,2 разу та у 1,5…1,8 разу.

На нижньому боці елемента виникають максимальні розтяжні термічні напруження (при збільшенні зовнішнього теплового потоку q_n від $1{,}5\cdot10^5$ Вт/м^2 до $2{,}3\cdot10^6$ Вт/м^2 значення $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ зростають у 1,8…2,1 разу для Ti + $NaNO_3$, а для Ti + $Ba(NO_3)_2$ – у 2,2…2,4 разу). При цьому збільшення часу зовнішньої теплової дії від t = 0,3 с до 1,5 с призводить до зростання $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ та $|\sigma_{zz}|_{max}$ у 1,4…1,6 разу для Ti + $NaNO_3$ та Ti + $Ba(NO_3)_2$.

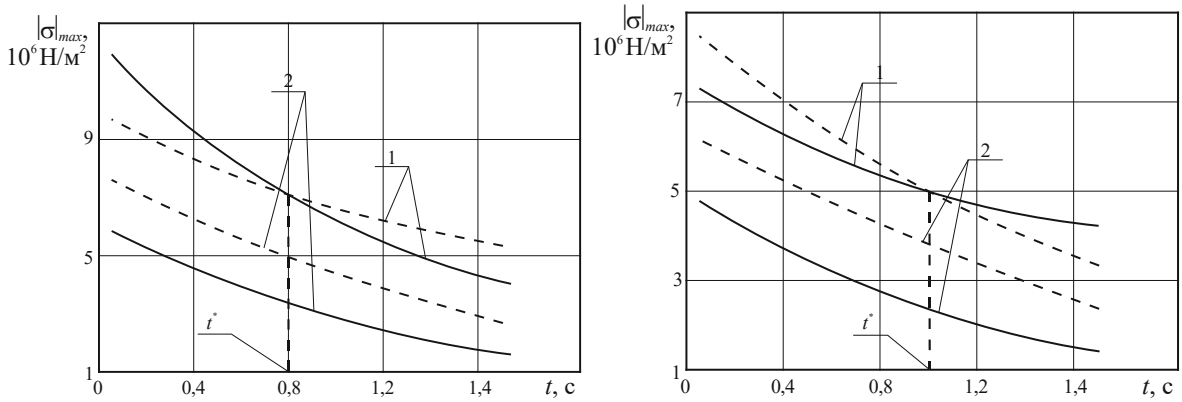


а) б)

Рис. 4. Розподіл термічних напружень по товщині плоского зразка з Ti + $NaNO_3$ (а) та Ti + $Ba(NO_3)_2$ (б) залежно від зовнішнього теплового потоку q_n (T_0 = 300 К; B = 0,01 м; H = 0,04 м; L = 0,1 м; t = 0,6 с; ξ_{Ti} = 61 %; K_V = 0,9…0,95; d_N = 50 мкм; порошок титановий марки ПТМ): 1 – $q_n = 1{,}6\cdot10^5$ Вт/м^2; 2 – $q_n = 2{,}1\cdot10^5$ Вт/м^2

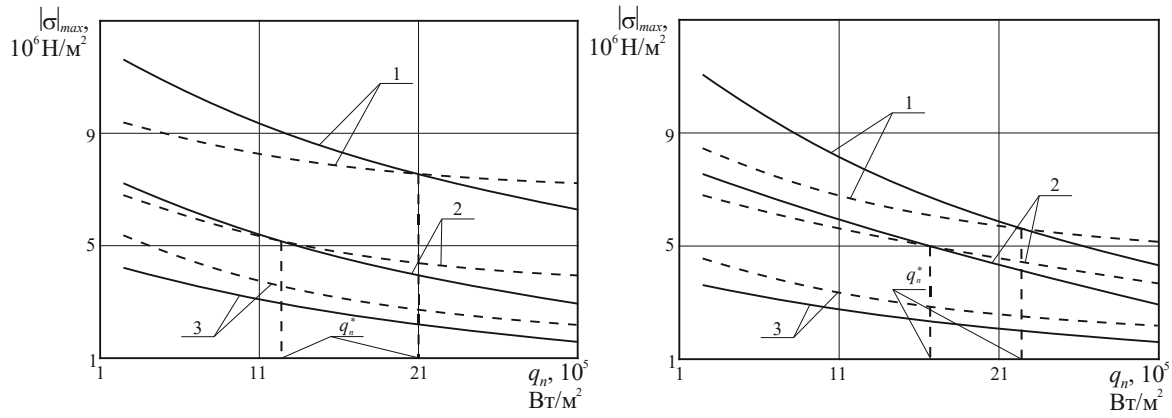
Радіальні термічні напруження σ_{rr} досягають максимальних значень всередині зразка в точках $r^*/R_w \approx 0{,}49…0{,}52$ для розглядуваних діапазонів

зміни параметрів зовнішніх термодій: q_n = 1,5·10^5…2,3·10^6 Вт/м^2 та t = 0,3…14 с.



а) б)

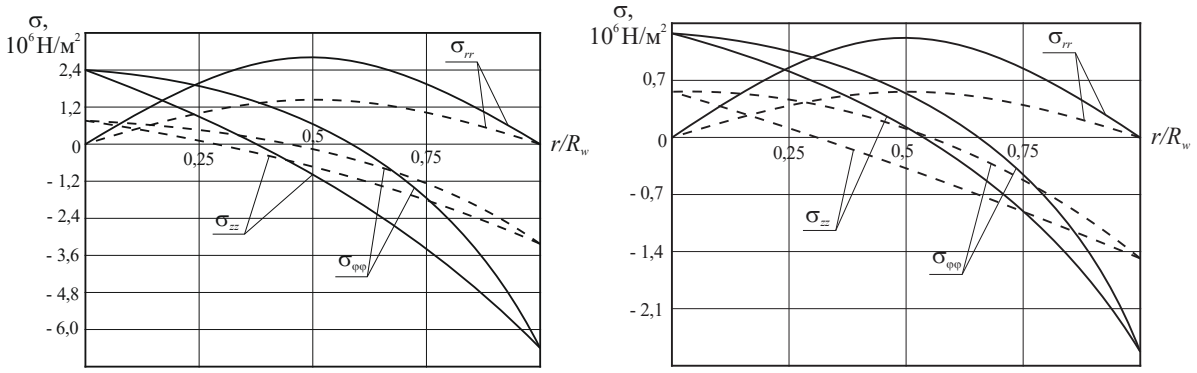
Рис. 5. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоскому зразку з Ti + $NaNO_3$ (а) та Ti + $Ba(NO_3)_2$ (б) від часу зовнішньої теплової дії для різних значень зовнішнього теплового потоку (T_0 = 300 К; B = 0,01 м; H = 0,04 м; L = 0,1 м; ξ_{Ti} = 61 %; $K_У$ = 0,9…0,95; d_N = 50 мкм; порошок титановий марки ПТМ): 1 – q_n = 2,1·10^6 Вт/м^2; 2 – q_n = 1,6·10^5 Вт/м^2; t*– критичний час дії, с; ———— – результати розрахунків; – – – – – – експериментальна крива межі міцності зразка суміші



а) б)

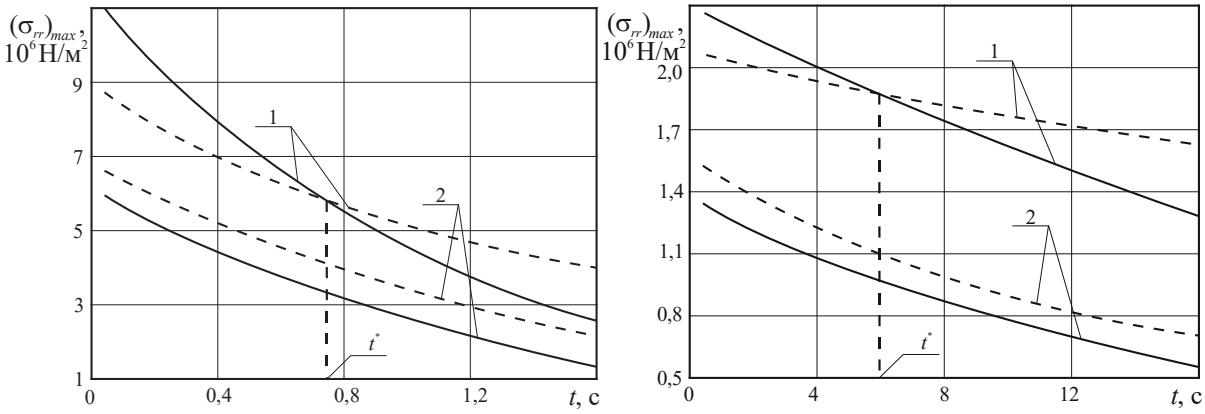
Рис. 6. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma|_{max}$ у плоских зразків з Ti + $NaNO_3$ (а) та Ti + $Ba(NO_3)_2$ (б) від зовнішнього теплового потоку для різних часів його дії (T_0 = 300 К; B = 0,01 м; H = 0,04 м; L = 0,1 м; ξ_{Ti} = 61 %; $K_У$ = 0,9…0,95; d_N = 50 мкм; порошок титановий марки ПТМ): 1 – t = 1,4 с; 2 – t = 0,2 с; 3 – t = 0,85 с; 4 – t = 0,1 с; q_n^* – критичні значення зовнішнього теплового потоку, Вт/м^2; —— —— – результати розрахунків; – – – – – – експериментальна крива межі міцності зразка суміші

Збільшення q_n та t у вказаних вище діапазонах зміни призводить до зростання максимальних значень термопружних напружень $(\sigma_{rr})_{max}$ у 2,6…3,3 разу для Ti + $NaNO_3$ та у 2,4…3,2 разу для Ti + $Ba(NO_3)_2$. При цьому по усій товщині зразка радіальні термопружні напруження є розтяжними ($\sigma_{rr} > 0$).



а) б)

Рис. 7. Розподіл термопружних напружень по товщині циліндричних зразків з Ti + $NaNO_3$ (а) та Ti + $Ba(NO_3)_2$ (б) в залежності від величини зовнішнього теплового потоку (T_0 = 300 К; R_w = 0,04 м; t = 0,5 с; ξ_{Ti} = 61 %; K_V = 0,9…0,95; d_N = 50 мкм; порошок титановий марки ПТМ): ———— – $q_n = 2{,}3 \cdot 10^6$ Вт/м^2; – – – – – – $q_n = 1{,}5 \cdot 10^5$ Вт/м^2.



а) б)

Рис. 8. Залежність максимальних термопружних напружень $(\sigma_{rr})_{max}$ від часу зовнішньої теплової дії на поверхню циліндричних зразків з Ti + $NaNO_3$ (а) та Ti + $Ba(NO_3)_2$ (б) для різних значень зовнішнього теплового потоку (T_0 = 300 К; R_w = 0,04 м; t = 0,5 с; ξ_{Ti} = 61 %; K_V = 0,9…0,95; d_N = 50 мкм; порошок титановий марки ПТМ): 1 – $q_n = 2{,}3 \cdot 10^6$ Вт/м^2; 2 – $q_n = 1{,}3 \cdot 10^5$ Вт/м^2; t^* – критичні значення часу дії; – – – – – – експериментальна крива межі міцності зразка суміші.

Висновки

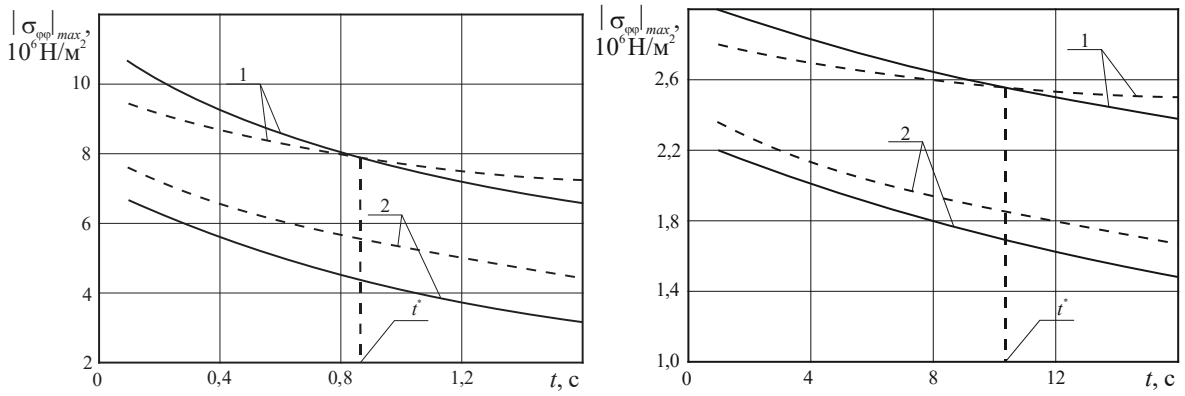
1. Розроблено математичні моделі зовнішніх термічних дій на заряди піротехнічних нітратно-титанових сумішей різної геометричної форми та розмірів (плоскі пластини, циліндричні елементи), які відрізняються від відомих тим, що вони враховують температурні залежності теплофізичних властивостей матеріалу (об'ємної теплоємності $C_V(T)$, коефіцієнта теплопровідності $\lambda(T)$). Моделі дозволяють більш точно визначати (відносну похибку знижено з 12…15 % до 8…10 %) критичні значення зовнішніх теплових потоків та тривалостей їх впливу, попереджаючи можливі руйнування зарядів (утворення тріщин, відшарувань та ін.), які призводять до вибухонебезпечного розвитку процесу займання сумішей при спрацьовуванні піротехнічних виробів.

2. Встановлено, що збільшення часу теплової дії від t = 3 с до t = 15 с при q_n = 1,5·10^5…2,1·10^6 Вт/м^2 (плоский зразок) призводить до зростання величини максимальних термопружних напружень у 1,9…4,1 разу – для суміші Ti + $NaNO_3$ та у 1,6…3,8 разу – для суміші Ti + $Ba(NO_3)_2$.

3. Показано, що при збільшенні зовнішнього теплового потоку q_n від 1,5·10^5 Вт/м^2 до 2,3·10^6 Вт/м^2 при t = 0,3…15 с (циліндричний зразок) максимальні термопружні напруження зростають у 1,3…1,6 разу для суміші Ti + $NaNO_3$, а для суміші Ti + $Ba(NO_3)_2$ – у 1,7…2,3 разу; при цьому радіальні термічні напруження досягають максимальних значень в середині зразка в точках $r \cong (0{,}49…0{,}52)R_w$ для розглядуваних діапазонів зміни параметрів зовнішніх термодій.

4. Вперше визначено критичні значення параметрів зовнішніх термодій (величини теплового потоку q_{ni}^* та часів його дії t_{ni}^* (i = 1, 2,…)) на поверхню зразків піротехнічних сумішей, перевищення яких призводить до їх поверхневого руйнування (утворення тріщин, відшарувань та ін.),

зменшення міцності, що у кінцевому підсумку, викликає вибухонебезпечне спрацьовування піротехнічних виробів в умовах експлуатації.



а) б)

Рис. 9. Залежність модуля максимальних термопружних напружень $|\sigma_{\varphi\varphi}|_{max}$ від часу зовнішньої теплової дії на поверхню циліндричних зразків з Ti + $NaNO_3$ (а) та Ti + $Ba(NO_3)_2$ (б) для різних значень зовнішнього теплового потоку (T_0 = 300 К; t = 0,5 с): 1 – $q_n = 2{,}3 \cdot 10^6$ Вт/м^2; 2 – $q_n = 1{,}5 \cdot 10^5$ Вт/м^2; t^* – критичні значення часу дії; – – – – – – експериментальна крива межі міцності зразка суміші.

Література

1. Шидловский А. А. Основы пиротехники / А. А. Шидловский. М.: Машиностроение, 1973. 320 с.
2. Силин Н. А. Горение металлизированных гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. М.: Машиностроение, 1982. 232 с.
3. Тарасов В. В. Инфракрасные системы "смотрящего" типа / В. В. Тарасов, Ю. Г. Якушенков. М.: Логос, 2004. 444 с.
4. Глущенко А. Р. Танковые ночные системы и приборы наблюдения / А. Р. Глущенко, В. И. Гордиенко, А. В. Бурак, А. Ю. Денисенко. Черкассы: Фотоприбор, 2007. 441 с.

5. 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.
6. Кириченко О. В. Дослідження впливу температури нагріву та зовнішнього тиску на залежності швидкості горіння ПНС від співвідношення компонентів та концентраційні межі горіння / О. В. Кириченко // Сб. "Труды Одесского национального политехнического университета", 2010. Вып. 2(6). С. 191-196.
7. Кириченко О. В. Основи пожежної безпеки піротехнічних нітратовмісних виробів в умовах зовнішніх термовпливів. Монографія / О. В. Кириченко, П. С. Пашковський, В. А. Ващенко, Ю. Г. Лега. К.: Наукова думка, 2012. 318 с.
8. Кириченко О. В. Экспериментально-статические модели для прогнозирования влияния внешних термовоздействий на скорость горения пиротехнических смесей / О. В. Кириченко // Вестник КИИ. Минск: КИИ МЧС РБ, 2013. № 2(18). С. 35-41.
9. Кириченко О. В. Скорость и предельные режимы горения трехкомпонентных пиротехнических смесей в условиях внешних термовоздействий / О. В. Кириченко // Международный научно-практический журнал "Пожаровзрывобезопасность". Россия. М.: Пожнаука, 2013. № 5. С. 20-25.
10. Кириченко О. В. Влияние повышенных температур нагрева и внешних давлений на скорость и предельные режимы горения пиротехнических нитратно-алюминиевых смесей / О. В. Кириченко // Международный научно-практический журнал "Чрезвычайные ситуации: промышленная и экологическая безопасность". Россия. Краснодар: Кубанский социально-экономический институт, 2013. № 2. С. 18-23.

11. Кириченко О. В., Діброва О. С., Мотрічук Р. Б., Ващенко В. А., Колінько С. О., Цибулдін В. В. Дослідження впливу міцності зарядів піротехнічних нітратно-металевих сумішей на пожежну безпеку виробів на їх основі / О. В. Кириченко, О. С. Діброва, Р. Б. Мотрічук, В. А. Ващенко, С. О. Колінько, В. В. Цибулдін // Вісник ЧДТУ, 2019. № 4. С. 79-81.
12. Вогман Л. П. Нормирование пожарной опасности фейерверочных пиротехнических изделий бытового назначения / Л. П. Вогман, О. В. Сотников // Пожаровзрывобезопасность. 1998. № 2. С. 3-11.
13. Вогман Л. П. Требования пожарной безопасности к пиротехническим изделиям бытового назначения / Л. П. Вогман, В. В. Лепесий // Пожаровзрывобезопасность. 1998. № 4. С. 51-57.
14. Вогман Л. П. Разработка рекомендаций по обеспечению пожарной безопасности фейерверочных пиротехнических изделий / Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, В. Е. Татаров, В. В. Лепесий // Пожаровзрывобезопасность. 2002. № 3. С. 24-41.
15. ГОСТ Р 51271 – 99. Изделия пиротехнические. Методы сертификационных испытаний.
16. ГОСТ Р 51270 – 2000. Изделия пиротехнические. Общие требования безопасности.
17. Кириллов Г. Н. Требования пожарной безопасности при обращении пиротехнической продукции. Обзорно-аналитический материал / Г. Н. Кириллов, Ю. И. Дешевых, А. Н. Гилетич, Л. П. Вогман, В. А. Зуйков, А. Н. Нестругин, А. М. Пшеничников. М.: ВНИИПО и ДНД МЧС России, 2010. 19 с.
18. СТО 4. 3. 1 – 2003. Изделия пиротехнические. Правила безопасности при обращении с пиротехнической продукцией. Ассоциация "Рапид-фейерверк", г. Сергиев-Посад, 2013. 15 с.

19. Силин Н. А. Металлические горючие гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Л. Я. Кашпоров и др. М.: Машиностроение, 1976. 320 с.
20. Силин Н. А. Окислители гетерогенных конденсированных систем / Н. А. Силин, В. А. Ващенко, Н. И. Зарипов и др. М.: Машиностроение, 1978. 456 с.
21. Карташов Э. М. Аналитические методы в теплопроводности твердых тел / Э. М. Карташов. М.: Высшая школа, 1985. 324 с.
22. Коваленко А. Д. Основы термоупругости / А. Д. Коваленко. К.: Наукова думка, 1970. 307 с.
23. Вигак В. С. Управление температурными напряжениями и перемещениями / В. С. Вигак. К.: Наукова думка, 1988. 312 с.
24. Алексеев Е. М. Решение задач вычислительной математики в пакетах MathCAD, MathLAB, Maple9 / Е. М. Алексеев. 2006. 496 с.