PROBLEMY MECHATRONIKI
UZBROJENIE, LOTNICTWO, INŻYNIERIA BEZPIECZEŃSTWA

ISSN 2081-5891

4, 4 (14), 2013, 41-52

Model numeryczny uderzeniowego pobudzenia spłonki w urządzeniu testowym ITWL*

Jarosław DĘBIŃSKI, Andrzej DŁUGOŁĘCKI, Andrzej FARYŃSKI

Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych
ul. Księcia Bolesława 6, 01-494 Warszawa

Streszczenie. Wyniki uzyskane na urządzeniu opisanym w pracy [1] zinterpretowano za pomocą modelu numerycznego. Uzyskano zgodność przebiegów zwłoki czasowej (400-100 μs), zagłębienia wgniatanej iglicy (ok. 360 μm) i energii pochłoniętej do chwili zadziałania spłonki (ok. 160 mJ) w funkcji energii dysponowanej uderzaka (200-1500 mJ) – obliczonych w ramach modelu i wyznaczonych na podstawie danych doświadczalnych. Rozbieżności wartości energii wyznaczanej za pomocą akcelerometru związanego z uderzakiem i pochłanianej w materiale spłonki (metalu i materiale pirotechnicznym) w danym układzie mechanicznym zależą od zwłoki czasowej. Energia zużyta na pobudzenie materiału pirotechnicznego (ok. 3,3 mJ) jest dużo mniejsza od całkowitej energii pochłoniętej.
Słowa kluczowe: fizyka wybuchu, spłonka uderzeniowa, zwłoka czasowa, zagłębienie iglicy, energia wejściowa dysponowana, energia pochłonięta

1. WSTĘP

Za pomocą układu do badania spłonek (rys. 1a), opisanego w pracy [1] badano zmianę parametrów związanych z pobudzeniem spłonki uderzeniowej typu KWM-3, czyli:

– zwłoki czasowej τ_Z;
– zagłębienia iglicy x_Z;
– energii pochłoniętej E_{abs},

* Artykuł został opracowany na podstawie referatu prezentowanego podczas IX Międzynarodowej Konferencji Uzbrojeniowej nt. „Naukowe aspekty techniki uzbrojenia i bezpieczeństwa", Pułtusk, 25-28 września 2012 r.

od początku zagłębiania iglicy w dno spłonki do momentu pobudzenia, rozumianego jako pojawienie się świecenia związanego z reakcją rozkładu materiału pirotechnicznego (MP) – w funkcji dysponowanej energii wejściowej

$$E_{we} = M \cdot g \cdot H$$

gdzie: M – masa (uderzak) zrzucana z wysokości H na iglicę o końcówce kulistej, opartą o dno spłonki,

g – przyspieszenie ziemskie.

Wyniki pomiarów w zakresie energii E_{we} dużo wyższych od energii, przy których zadziałało > 90% badanych spłonek (ok. 180 mJ [1]) wskazują, że pobudzenie MP spłonki następowało po osiągnięciu zawsze tego samego zagłębienia iglicy (rys. 5b, krzywa 1), co sugeruje termiczny charakter inicjowania reakcji rozkładu MP.

Akcelerometr mierzący opóźnienie uderzaka $a(t)$ w czasie wgniatania iglicy w dno spłonki umocowany był w miejscu, które elementy sprężyste oddzielały od miejsca styku iglicy i dna spłonki (gdzie ta energia była wydzielana), więc energia

$$E_{abs}^{a} = \int_0^{\tau_Z} M \cdot a(t) \int_0^{\tau_Z} a(\xi) d\xi dt$$

nie musiała być równa energii wydzielanej w spłonce E_{abs}.

Aby oszacować zależność E_{abs} od „zmierzonej" E^{a}_{abs}, zbudowano prosty numeryczny model oddziaływań w obrębie uderzaka, iglicy i elementów spłonki (rys. 1b). Zawiera on model wydzielania energii (patrz niżej)

$$E_{MP}(t) = \int_0^t F_{PIR} dx_5$$

w MP spłonki, pozwalający na określenie kluczowej wielkości τ_Z, a więc również wielkości

$$x_Z = x_5(\tau_Z),\ E_{MP}(\tau_Z),$$

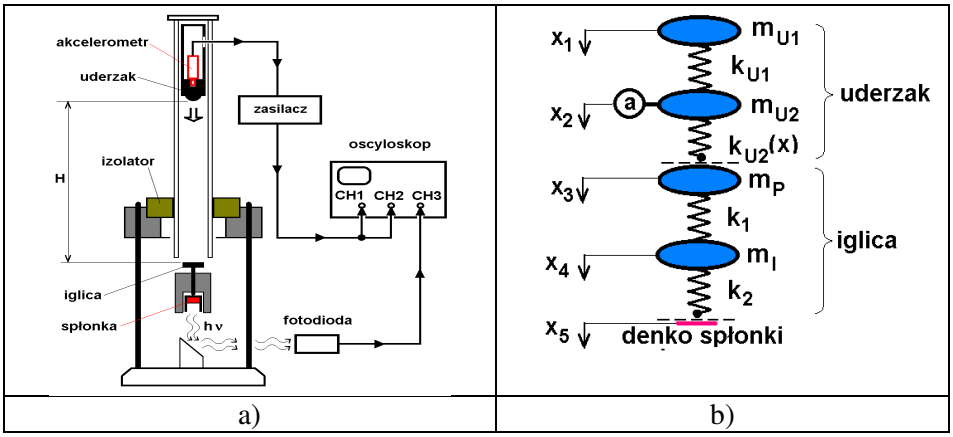
$$E_{abs}^{a} = \int_0^{\tau_Z} M \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} \int_0^{\tau_Z} \frac{d^2 x_2(\xi)}{d\xi^2} d\xi dt$$

oraz

$$E_{abs} = \int_0^{\tau_Z} F_{R5}(t) \frac{dx_5(t)}{dt} dt$$

2. OPIS MODELU

Schemat modelu pokazano na rysunku 1b. W uderzaku masa m_{U1} połączona jest sztywno poprzez „sprężynę” (tuleja łącząca) o stałej k_{U1} z masą m_{U2}, z którą związany jest akcelerometr ($m_{U1} + m_{U2} = M$). Stała k_{U1} obliczana jest dla szeregowego połączenia prętów walcowych o różnych przekrojach i długościach wynikających z konstrukcji uderzaka, dla modułów sprężystości (Younga) stali i Al odpowiednio Y = 220 GPa i 71 GPa [2].



Rys. 1. a) Schemat układu pomiarowego, b) schemat zastępczy układu: uderzak – iglica – spłonka; „a” – miejsce zamocowania akcelerometru; „m” – masy punktowe, „x” – współrzędne, opisujące ruch tych mas, „k” – parametry liniowych elementów sprężystych; $k_{U2}(x)$ – nieliniowa charaktrystyka sprężyny; linią przerywaną zaznaczono połączenia swobodne

Fig. 1. a) Measuring kit block diagram, b) equivalent scheme of the set: striking mass – firing pin – percussion cap bottom; „a” – a place where the accelerometer is fitted; „m” – point masses; „x” – coordinates describing these masses movements; „k” – constants of the linear springy elements; $k_{U2}(x)$ – nonlinear spring characteristic; with a dashed curve non-bound connections are marked

Kulka stalowa o promieniu r_K, związana sztywno z masą m_{U2}, o nieliniowej charakterystyce sprężystej $k_{U2}(x)$ takiej, że siła odkształcająca ją [3] wyraża się wzorem

$$F_{U2} = (Y/2)\,(r_K\,((x_2 - x_3)/0{,}775)^3)^{1/2} \qquad (1)$$

(działa tylko wtedy, gdy $x_2 > x_3$), naciska (uderza) wraz z całym uderzakiem z prędkością v_0 na masę pośrednią m_P związaną sztywno poprzez „sprężynę” k_1 z iglicą o masie m_I, opartą o powierzchnię dna spłonki poprzez „sprężynę” o stałej k_2.

Stałe k_1 i k_2 są stałymi prętów (stalowych walców), na jakie sztucznie dzieli iglicę położenie jej środka masy względem masy m_P . Uderzak i iglica nie odkształcają się plastycznie. Wszystkie masy są punktowe.

Oddziaływania w tym układzie można opisać następującym układem równań:

$$\begin{aligned} d^2x_1/dt^2 &= -F_{U1} / m_{U1}, \\ d^2x_2/dt^2 &= F_{U1} / m_{U2} - F_{U2} / m_{U2}, \qquad F_{U1} = k_{U1}\,(x_1 - x_2), \\ d^2x_3/dt^2 &= F_{U2} / m_P - F_{R3} / m_P, \qquad F_{R3} = k_1\,(x_3 - x_4), \\ d^2x_4/dt^2 &= F_{R3} / m_I - F_{R5} / m_I, \end{aligned} \tag{2}$$

z warunkami początkowymi:

$$x_1(0) = x_2(0) = x_3(0) = x_4(0) = x_5(0) = dx_3/dt\,(0) = dx_4/dt\,(0) = 0,$$
$$dx_1/dt\,(0) = dx_2/dt\,(0) = v_0.$$

Położenie minimum wgłębienia iglicy w dno spłonki opisuje „sztuczna" współrzędna x_5. Siła sprężystości

$$F_{R5} = k_2\,(x_4 - x_5)$$

przeciwdziała działającym równolegle siłom: odkształcenia plastycznego dna spłonki F_T oraz F_{PIR} – ścinania MP (patrz dalej). Dopóki siła F_{R5} jest mniejsza od siły $F_T + F_{PIR}$, x_5 się nie zmienia; w przeciwnym razie następuje wzrost x_5 (która odpowiada x na rysunku 2a): $x_5 = x_4 - (F_T + F_{PIR}) / k_2$.

2.1. Odkształcanie plastyczne dna spłonki – siła F_T

W trakcie uderzenia iglica jest hamowana na drodze x (rys. 2a) głównie siłą ścinania

$$F_T(x) \approx 2 \cdot \pi \cdot \delta \cdot R_T \cdot [r_I^2 - (r_I - x)^2]^{1/2} \tag{3}$$

materiału dna spłonki o grubości δ na bocznej powierzchni cylindra o aktualnej średnicy krawędzi wgniecenia

$$2\,r_W = 2\,[r_I^2 - (r_I - x)^2]^{1/2}$$

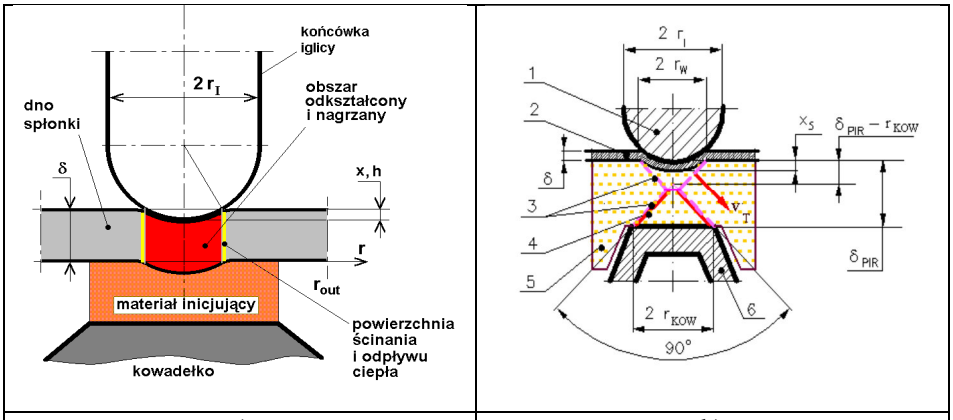
gdzie R_T jest wytrzymałością na ścinanie.
Praca nad wykonaniem wgniecenia o głębokości h wynosi

$$W_T(h) = \int_0^h F_T(\xi)\,d\xi$$

Dla danych $h = 0{,}5$ mm, $\delta = 0{,}4$ mm, $R_T = 200$ MPa [2] (mosiądz miękki) praca nad wykonaniem wgniecenia jest równa

$$W_T = 2\,\pi\,\delta\,R_T\,[(r_I^2 / 2)\,(\pi / 2 + \arcsin((h - r_I) / r_I)) + 0{,}5\,(h - r_I)\,(h\,(2r_I - h))^{1/2}] \approx 190 \text{ mJ}$$

co jest wartością rzędu energii pochłanianej do momentu zadziałania spłonki w eksperymentach.



a) b)

Rys. 2. Schemat wgniatania iglicy w dno spłonki; a) odkształcanie dna spłonki; b) schemat ścinania MP: 1 – końcówka iglicy, 2 – dno spłonki, 3 – powierzchnie ścinania MP, 4 – obszar najintensywniejszego grzania (warstwa o grubości w_G), 5 – sprasowana MP, 6 – kowadełko, v_T – prędkość względna powierzchni ścinających

Fig. 2. Scheme of firing pin into the percussion cap bottom pressing; a) p.cap bottom deformation; b) scheme of the pyrotechnic mixture (MP) shearing: 1 – firing pin tip, 2 – percussion cap bottom, 3 – surfaces of the MP shearing; 4 – area of most intensive heating (layer of thickness w_G), 5 – the pressed MP shape, 6 – anvil, v_T – relative velocity of MP parts on the shearing surface

Zamiana W_T bez strat na ciepło metalu odkształconego wgnieceniem, przy cieple właściwym mosiądzu $c_V = 3{,}18$ MJ / m^3/K, skutkuje jednorodnym ogrzaniem obszaru odkształconego o ok. 48 K.

Ze względu na dużo większe przewodnictwo cieplne metalu niż MP można założyć, że te dwa ośrodki grzeją się niezależnie. Dyfuzyjny nagrzew przygranicznej (w stosunku do metalu) warstwy MP jest więc wysoce niewystarczający w porównaniu z temperaturą inicjacji piorunianu rtęci Hg $(CNO)_2$ wchodzącego w skład MP wynoszącą od 165°C [4] do 180°C [5] (obecność pozostałych składników może temperaturę inicjacji – dla całości MP – nieco podnieść).

2.2. Ognisko inicjacji wewnątrz MP – siła F_{PIR}

Dno spłonki styka się z kształtką MP, wytworzoną poprzez zaprasowanie pod wysokim ciśnieniem mieszaniny $Hg(CNO)_2$, Sb_2S_3 i $KClO_3$ o pierwotnych rozmiarach ziaren ~10 μm i mającą konsystencję zbliżoną do lodu lub cegły, mogącą więc w pewnych granicach naprężeń zachowywać się jako ośrodek ciągły o wytrzymałości na ścinanie R_{MP} ~1-10 MPa.

Sposób ściskania kształtki, skutkujący wydzielaniem w niej ciepła, zależy od geometrii iglicy, warstwy MP i kowadełka. Przyjęto, że:

- Nacisk iglicy o końcówce kulistej generuje w MP dwa stożki skierowane ku sobie wierzchołkami (rys. 2b), o kątach wierzchołkowych ok. 90° (w trakcie zgniatania mogą przekształcić się w stożki ścięte); na powierzchniach tych stożków naprężenia ścinające osiągają maksimum. Stożek „górny" oparty jest podstawą o obszar wgniecenia dna o promieniu r_W i ma powierzchnię boczną $S_{górne}$. Podstawą stożka „dolnego" o powierzchni bocznej S_{dolne} jest powierzchnia nieruchomego kowadełka o promieniu r_{KOW}. Grubość warstwy MP – nieprzekraczalna suma wysokości stożków – wynosi δ_{PIR} .
- Wewnątrz stożków materiał MP jest ściskany quasi-izotropowo w sposób uniemożliwiający wykonanie na nim pracy. Zbliżające się ku sobie stożki rozpychają resztę MP na boki i na powierzchniach tych stożków o sumarycznej wartości $S_{DEF} = S_{dolne} + S_{górne}$ wykonywana jest praca przy pokonywaniu naprężeń ścinających R_{MP} sumaryczną siłą $F_{PIR} = R_{MP}\, S_{DEF} \cos 45°$. „Poślizg" ośrodka wypychanego na zewnątrz po powierzchni stożków odbywa się z prędkością $v_T = 0{,}5\ \mathrm{d}r_W/\mathrm{d}t/\ 2^{1/2}$.

  Powierzchnia $S_{górne}$ przemieszcza się względem ośrodka MP, w którym rozprasza się wydzielane na niej ciepło. Dolna część powierzchni S_{dolne} nie przemieszcza się względem MP i w jej sąsiedztwie możliwa jest kumulacja wydzielanego ciepła, aż do osiągnięcia temperatury zapłonu. Wyrażenia na $S_{górne}$ i S_{dolne} zależą od konkretnej geometrii układu denko – kształtka MP – kowadełko.
- Powierzchnia stożka „dolnego" dzieli od opływającej masy zewnętrznej **wciąż tę samą masę** wewnątrz tego stożka, która na jego powierzchni nagrzewa się coraz bardziej; na grzanie masy „wewnętrznej" zużywana jest połowa wydzielanego na tej powierzchni ciepła.

  Ciepło wydzielone na skutek pracy ścinania na jednostkę powierzchni stożka po czasie t (od początku procesu):

$$Q \approx \frac{0{,}5\, R_{MP}}{\sqrt{2}} \int_0^t \left(\frac{dr_W}{d\xi}\right) d\xi \approx \frac{1}{2} R_{MP} \cdot \frac{r_W}{\sqrt{2}}$$

dyfunduje w obie strony od powierzchni ścinania, ale kumuluje się po stronie wnętrza stożka w warstwie o grubości w_G (**ognisko – lub ogniska pobudzenia MP**).

Oznaczając ΔT jako przyrost w czasie t temperatury na chłodniejszej powierzchni warstwy w_G (od strony wnętrza stożka), można napisać

$$Q / 2 \approx R_{MP}\, r_W / 2^{1/2} / 4 = \Delta T\, w_G\, \rho\, c_p,$$

skąd $\Delta T(t) \approx 0{,}18\, R_{MP}\, r_W(t) / (w_G\, \rho\, c_p)$,
gdzie $\rho \approx 2300$ kgm^{-3} jest gęstością, $c_p \approx 950$ J/kg/K – ciepłem właściwym MP (wartości parametrów odpowiadają w przybliżeniu podobnym substancjom [2]).

Układ równań (2) z opisanymi wyżej siłami rozwiązywano metodą Rungego – Kutty dla następującego zestawu danych

$$R_T = 300 \text{ MPa}, m_{U1} = 50 \text{ g}, m_{U2} = 260 \text{ g}, m_P = 5{,}8 \text{ g}, m_I = 4{,}56 \text{ g},$$
$$k_{U1} = 1{,}28 \times 10^8 \text{ N/m}, k_1 = 2{,}87 \times 10^8 \text{ N/m}, k_2 = 1{,}05 \times 10^8 \text{ N/m}, r_I = 1{,}25 \text{ mm},$$
$$\delta = 0{,}4 \text{ mm}, \delta_{PIR} = 0{,}65 \text{ mm}, r_{KOW} = 0{,}5 \text{ mm}.$$

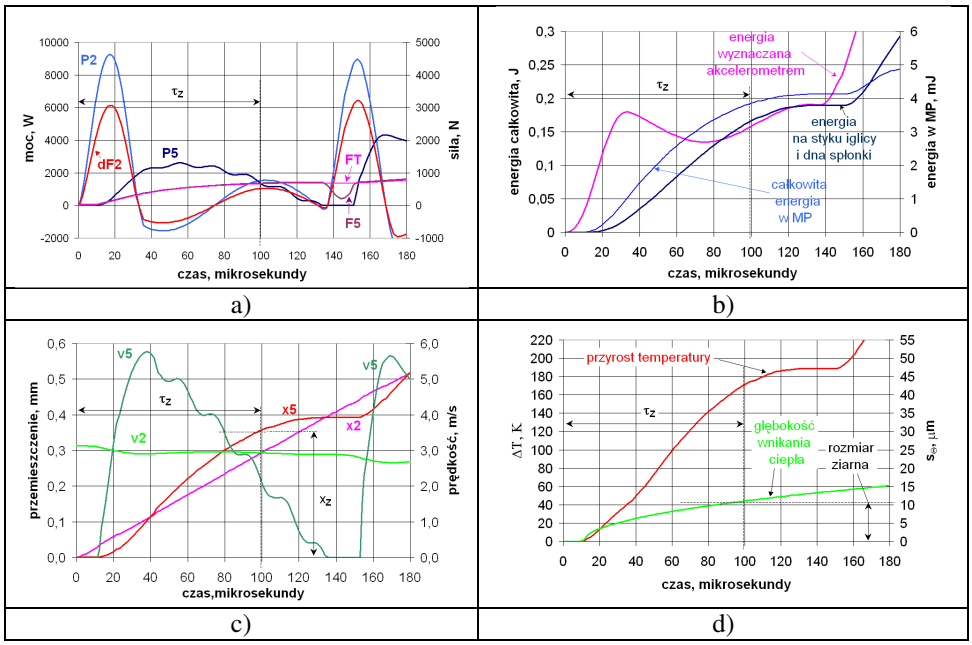
Kryterium wyznaczenia τ_Z, x_Z itd. stanowiło osiągnięcie $\Delta T = 170$ K (wartość nieco przewyższająca – z uwzględnieniem temperatury otoczenia – „literaturową" temperaturę pobudzenia reakcji rozkładu $Hg(CNO)_2$). Propagacja frontu palenia / detonacji przez objętość MP trwa dużo krócej od τ_Z – prędkość detonacji $Hg(CNO)_2$ wynosi 4800 m/s [5]. Obliczenia prowadzono w dwu wariantach:

– wariant „P" – gdzie $w_G = 10$ μm = const, $R_{MP} = 13$ MPa oraz
– wariant „Q" – gdzie $w_G = \varphi\, s_\theta$;

W powyższych wariantach:

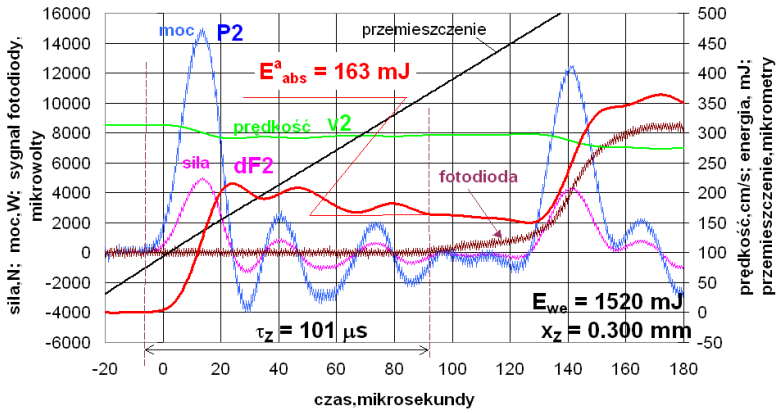
– wartość $s_\theta \approx (\lambda\, t_d / \rho / c_p)^{1/2}$ odpowiada w procesie dyfuzji ciepła o dość szerokiej klasie warunków brzegowych [6] – odległości od powierzchni, na której temperatura maleje w przybliżeniu e-krotnie;
– $\varphi = e\,(1 - 1/e) \approx 1{,}72$ jest współczynnikiem kształtu, wynikającym z założonego wykładniczego zaniku temperatury w głąb ośrodka;
– $\lambda \approx 0{,}25$ W/m/K jest współczynnikiem przewodnictwa cieplnego MP.

Na rysunku 3 pokazano przykład przebiegu parametrów procesu zagłębiania iglicy w dno spłonki w wariancie „P". Na rysunkach 4 i 5 porównano przebiegi τ_Z, x_Z oraz pochłanianych energii w funkcji energii dysponowanej $E_{we} = M \cdot g \cdot H$.



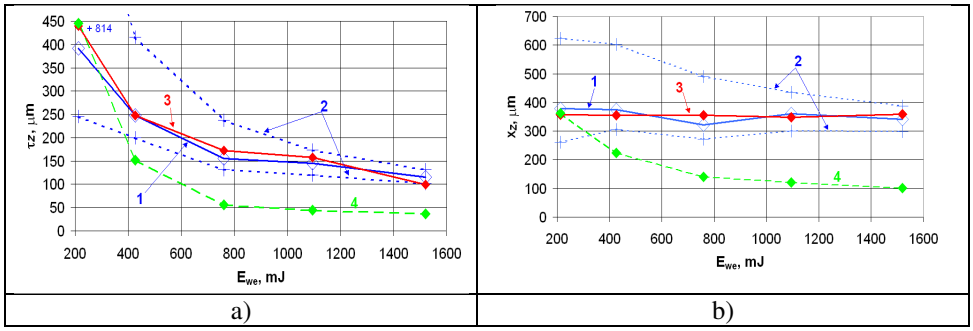
Rys. 3. Wielkości charakteryzujące oddziaływania w układzie uderzak – iglica – spłonka przy E_{we} = 1520 mJ (H = 0,5 m), obliczone modelem (2); a): $P2$ – moc dE^{a}_{abs}/dt, $dF2$ – siła, odpowiadające miejscu zamocowania akcelerometru, $P5$ – moc dE_{abs}/dt w miejscu styku iglicy i spłonki, FT – aktualna wartość siły ścinającej, $F5$ – nacisk na dno spłonki (F_{R5}); b): energia E^{a}_{abs} w punkcie umieszczenia akcelerometru i pochłaniana w spłonce (E_{abs} i E_{MP}); c): $x2$ i $x5$ – przemieszczenia x_2 i x_5, prędkości $v2 = dx_2/dt$, $v5 = dx_5/dt$; d): temperatura ogniska pobudzenia MP, „rozmiar ziarna" odpowiada w_G

Fig. 3. Quantities characterizing interactions inside the set: striking mass – firing pin – percussion cap bottom at E_{we} = 1520 mJ (H = 0,5 m), calculated with an aid of equations (2); a): $P2$ – power dE^{a}_{abs}/dt, $dF2$ – the force acting in the place where the accelerometer is fitted, $P5$ – power dE_{abs}/dt in the place of firing pin – percussion cap bottom contact, FT – current shearing force value, $F5$ – pressure exerted on the cap bottom (F_{R5}); b) energy E^{a}_{abs} at the place of accelerometer fitting and absorbed in percusion cap (E_{abs} i E_{MP}); c):): $x2$ i $x5$ – displacements x_2 i x_5, velocities $v2 = dx_2/dt$, $v5 = dx_5/dt$; d): "hot spot" temperature of MP ignition, "rozmiar ziarna" corresponds w_G



Rys. 4. Przykładowy doświadczalny przebieg w czasie parametrów mechanicznego pobudzania spłonki dla dużej dysponowanej energii pobudzenia; *P*2 i d*F*2 – jak na rys. 3

Fig. 4. An example of experimental time profiles of mechanical striking percussion cap ignition for high stimulation energy being at disposal E_{we}; *P*2 and d*F*2 – as in Fig. 3



a) b)

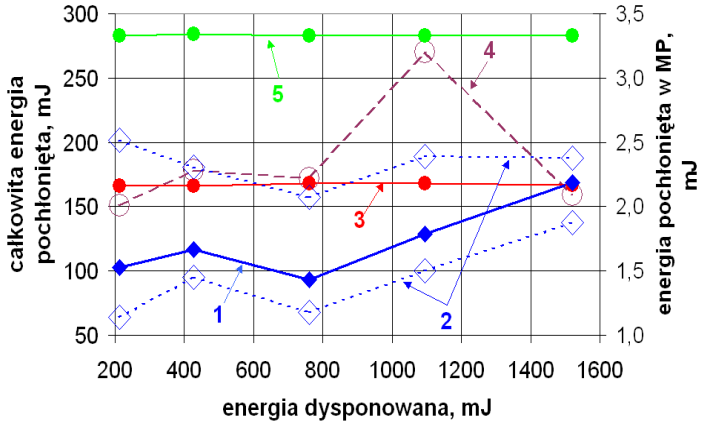
Rys. 5. Zmiana zwłoki czasowej (a) i zagłębienia iglicy do chwili pobudzenia (b) w funkcji energii dysponowanej; 1 – zmierzone wartości średnie, 2 – górne i dolne odchyłki w seriach („+816"– odchyłka opóźnienia w punkcie E_{we} = 213 mJ), 3 – wartości obliczone modelem (2) w wariancie „P" oraz 4 – w wariancie „Q" (patrz tekst)

Fig. 5. Change of a delay time (a) and firing pin immersing up to the ignition moment (b) as a function of stimulation energy being at disposal E_{we}; 1 – measured average values, 2 – upper and lower deviations in the measure series ((„+816"– delay deviation at E_{we} = 213 mJ), 3 – values calculated with an aid of equations (2) in the variant "P" and 4 – the same in the variant "Q" (see text)

3. WNIOSKI

Wyznaczone dla modelu numerycznego przebiegi czasowe przemieszczeń, prędkości, sił, mocy i energii (rys. 3) są zgodne jakościowo i co do rzędu wielkości z przebiegami doświadczalnymi (rys. 4).

Otrzymane za pomocą prezentowanego modelu przy **stałej grubości** warstwy grzanej w_G – przebiegi zwłoki czasowej (rys. 5a) i zagłębienia iglicy (rys. 5b) oraz pochłanianej energii do chwili pobudzenia w funkcji energii dysponowanej ($M \cdot g \cdot H$) (rys. 6) zgadzają się dobrze w granicach błędu pomiaru z przebiegami uzyskanymi doświadczalnie. Interesujące jest, że w_G, dla którego ta zgodność zachodzi, odpowiada rozmiarowi pierwotnych ziaren MP – być może na powierzchniach poślizgu tworzy się turbulentna warstwa kryształów, w obrębie której odbywa się intensywna konwekcyjna wymiana ciepła; zwłaszcza że istotnie odbiegają od danych doświadczalnych odpowiednie krzywe obliczone przy pozornie bardziej naturalnym założeniu – odpowiadającej procesowi dyfuzji ciepła – rosnącej w czasie grubości warstwy grzanej.



Rys. 6. Energia pochłaniana przez spłonkę w funkcji energii dysponowanej E_{we}: 1 – doświadczalne wartości średnie E^{a}_{abs}, 2 – górne i dolne odchyłki E^{a}_{abs} w seriach; wielkości obliczone za pomocą równań (2) w wariancie „P": 3 – E_{abs} dla miejsca x_5; 4 – E^{a}_{abs} dla miejsca x_2 (rys. 1b); 5 – E_{MP}

Fig. 6. Energy absorbed by a percussion cap (left – total, right – by pyrotechnic substance) as a function of stimulation energy being at disposal E_{we}: 1 – experimental average walues E^{a}_{abs}, 2 – upper and lower deviations E^{a}_{abs} in the measure series; quantities calculated with an aid of equations (2) in the variant „P": 3 – E_{abs} in the place x_5; 4 – E^{a}_{abs} in the place x_2 (Fig. 1b); 5 – E_{MP}

Tak zweryfikowany model wyjaśnia, że rozbieżności E^{a}_{abs} i E_{abs} wywołane są przemieszczaniem położenia punktu τ_Z względem faz sprężystych drgań podłużnych układu uderzaka – iglicy (które to drgania są źródłem maksimów E^{a}_{abs}) i są niewielkie (od –9 % do +7% – krzywe 3 i 4 na rys. 6) dla energii dysponowanej zbliżonej do średniej energii pobudzenia, zaś mogą stawać się znaczne (+61 %) dla niektórych wartości znacznie od niej większych.

Maksima E^{a}_{abs} (rys. 3b) mają stałe położenie na osi czasu. Pobudzenie MP następuje po dostarczeniu stałej energii E_{MP}, natomiast ze wzrostem E_{we} rośnie moc P (rys. 3a) jej dostarczania, czemu towarzyszy spadek τ_Z.

Obliczone wartości energii pochłoniętej $E_{MP} \approx 3{,}3$ mJ do chwili zadziałania zbliżone są do wyznaczonych dla spłonek elektrycznych [7].

LITERATURA

[1] Dębiński J., Długołęcki A., Faryński A., Olejniczak E., Żyluk A., Pomiary parametrów spłonek nakłuciowych, *Problemy mechatroniki. Uzbrojenie, lotnictwo, inżynieria bezpieczeństwa*, vol. 4, nr 2(12), s. 43-52, 2013.

[2] *Tablice fizyczno-astronomiczne* pod red. W. Mizerskiego, wyd. Adamantan, Warszawa, 2002.

[3] *Poradnik mechanika – warsztatowca*, praca zbiorowa, WNT, Warszawa, 1981.

[4] Meyer R., Koehler J., Homburg A., *Explosives*, Wiley-VCH Verlag GmbH, Weinheim, 2002.

[5] Epov B.A., *Osnovy vzryvnogo dela*, Voen. Izdat. Min. Obor. SSSR, Moskva, 1974.

[6] Knoepfel H., *Sverkhsilnye impulsnye magnitnye polya*, Mir, Moskva, 1972, także *Pulsed High Magnetic Fields*, North Holland, Amsterdam – London, 1970.

[7] Faryński A., Loroch L., Ziółkowski Z., Karpiński L., Charakterystyki energetyczne pobudzania spłonek elektrycznych i ich wpływ na odporność lotniczych środków bojowych na narażenia piorunowe – *IV Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Rozwój i Modernizacja Środków Bojowych"*, Skarżysko-Kamienna, 20-21.09.2001.

Numerical Model of Striking the Percussion Cap in the Air Force Institute of Technology (AFIT) Test Device

Jarosław DĘBIŃSKI, Andrzej DŁUGOŁĘCKI, Andrzej FARYŃSKI

Abstract. Results obtained on the device described in [1] were interpreted by means of the numerical model. A conformity of the model and experimentally based profiles of delay time (400-100 μs), firing pin immersing (360 μm approx.) and the absorbed energy (160 mJ approx.) up to the moment of percussion cap igniting versus the striking mass energy (200-1500 mJ) was obtained. A discrepancy of the energy values that determined with an aid of accelerometer mounted on the striking mass and that absorbed in the cap material (metal and pyrotechnic substance) depends on the delay time in a given mechanical system. The energy utilized to ignite a pyrotechnic material (3.3 mJ approx.) is much smaller then the total absorbed energy.
Keywords: physics of the explosion, percussion cap, time delay, firing pin immersing, stimulation energy being at disposal, absorbed energy