

Krzysztof **JAMROZIAK**
Miroslaw **BOCIAN**
Maciej **KULISIEWICZ**

OCENA PRZEBIJANIA UKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH W UJĘCIU MODELI ZDEGENEROWANYCH

Streszczenie. W artykule omówiono model przebijania układu kompozytowego osłony balistycznej pociskiem broni strzeleckiej. Na przykładzie wybranych wyników eksperymentalnych przeprowadzono identyfikację parametrów modelu matematycznego zjawiska przebijania. Podsumowano wnioskami.

Słowa kluczowe: analiza i modelowanie, osłony balistyczne, przebijanie, kompozyty, modele zdegenerowane.

1. WSTĘP

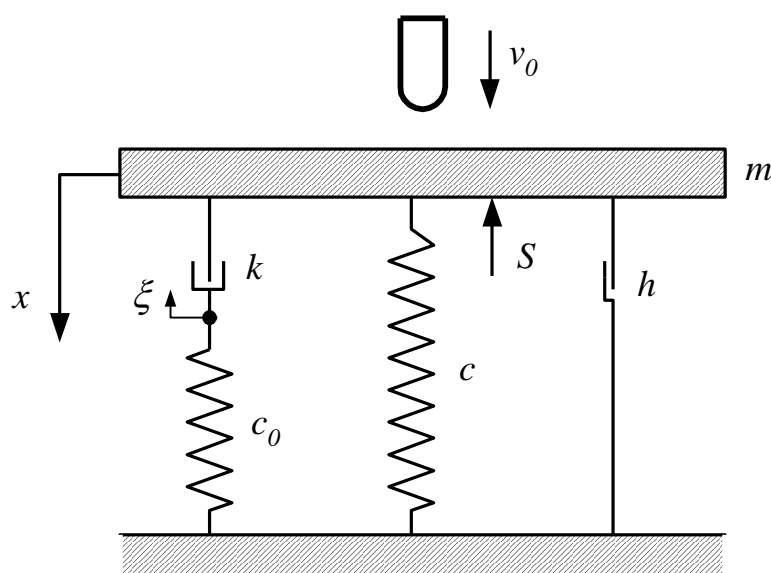
Zagadnieniom uderzeń balistycznych w procesie przebijania materiałów elementów konstrukcyjnych pojazdów lub/i maszyn poświęcono wiele opracowań z zakresu dysypacji energii [1-4]. Jednym z uniwersalnych kierunków realizacji tych zagadnień jest optymalizacja konstrukcji zdolnej do pochłaniania energii uderzenia generowanej pociskami o działaniu kinetycznym, fragmentujących pocisków, wybuchających min odłamkowych, a także nieskatologowanych min produkowanych między innymi w warunkach polowych (np. IED-Improvised Explosive Device, VBIED-Vehicle Borne IED, SVBIED-Suicide VBIED, EFP-Explosively Formed Projectile). Sprostanie takim zagrożeniom wymaga od konstruktorów wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej oraz skutków wynikających z oddziaływania energii uderzenia na obiekty techniczne w postaci kombinacji materiałowych stosowanych do budowy osłon balistycznych [5-6]. Realizacja tego zadania odbywa się wielotorowo. Pierwszym zadaniem jest rozpoznanie technologii i możliwości materiałów, które posiadają bardzo dobre właściwości pochłaniania energii uderzenia pocisku lub fali wybuchowej [3, 7]. Fakt, że kryteria ochrony balistycznej są ze sobą ściśle związane i częściowo przeciwstawne. Nie można nadmiernie podwyższać odporności balistycznej danego wyrobu (np. hełm, kamizelka), gdyż wzrastająca przy tym energia uderzenia pocisku (odłamka) musi być przyjęta przez odpowiednią jej konstrukcję nośną. Wartości graniczne danej osłony są zatem determinowane przyjętą dla danych warunków wielkością energii uderzenia pocisku (odłamka), możliwą do bezpiecznego zaabsorbowania przez określoną konstrukcję [8-9].

Istotnego znaczenia nabrały procedury związane z modelowaniem tych zjawisk z wykorzystaniem szerokiej gamy modeli [10-11], których celem jest opis zjawiska dysypacji energii uderzenia oraz optymalizowanie parametrów wartości granicznych osłon balistycznych. Także autorzy niniejszego artykułu wypracowali procedury adaptacji stosowania praktycznego modeli zdegenerowanych w procesie przebijania materiałów stosowanych do budowy osłon balistycznych. Trudności, na jakie napotyka zespół badawczy

są związane z niedostateczną znajomością zachowań dynamicznych tych modeli, które wywodzą się na ogół z przyjmowania nieliniowych złożonych związków konstytutywnych materiałów lub też różnorodnego łączenia reologicznych modeli typu Maxwella, z liniowymi elementami sprężystymi lub dysypatywnymi. W zagadnieniach zastosowań inżynierskich, obok oddziaływań sił reologicznych, zawsze występuje element masowy, który w warunkach obciążeń dynamicznych wywołuje siły bezwładnościowe. Uwzględnienie tych sił w równaniach dynamiki prowadzi do konieczności analizy układu zdegenerowanego, co jest obszarem badań [12-16] od kilku lat, autorów niniejszego artykułu.

2. DYNAMICZNY MODEL PRZYJĘTY DO ANALIZY

Przedmiotem niniejszej analizy dynamicznej jest proces rozpraszania energii uderzenia pocisku broni strzeleckiej uderzającego w osłonę balistyczną. Na wstępie założono, że na przebijający pocisk oddziałuje siła wewnętrzna opisana w postaci modelu zdegenerowanego z tarcie suchym prezentowanym na rys. 1.



Rys. 1. Dynamiczny model zdegenerowany uderzenia pocisku w osłonę

Na podstawie przyjętego modelu straty energii uderzenia opisywane są dwoma parametrami, a mianowicie tarcie suchym wyrażonym przez stałą h oraz tłumieniem w zakresie plastycznym wyrażonym przez stałą k . W tym przypadku stałe materiałowe modelu opisano parametrami c , c_0 , k , h , gdzie za c przyjęto współczynnik statycznej sztywności w zakresie sprężystym, a za c_0 współczynnik sztywności dynamicznej w zakresie sprężystym. Stała ξ opisuje ruch masy fikcyjnej.

Siła oporu S uzależniona jest od położenia x pocisku w materiale i jego prędkości $v = \dot{x}$ wyrażona zależnością:

$$S(x, v) = cx + c_0(x - \xi) + hSgn(v) \quad (1)$$

Opis ruchu masy m można przedstawić za pomocą następujących równań różniczkowych:

$$m\ddot{x} + c_0(x - \xi) + cx + h\text{Sgn}(\dot{x}) = 0 \quad (2)$$

$$c_0(x - \xi) = k\dot{\xi} \quad (3)$$

Straty energii uderzającego pocisku należy analizować w przedziale czasu $t \in (0, t_k)$, czyli do całkowitego wyhamowania pocisku, gdzie zakłada się następujące warunki początkowe:

$$t \in (0, t_k) \rightarrow \dot{x} > 0 \text{ to } \text{Sgn}\dot{x} = 1 \quad (4)$$

Następnie wyrugowanie stałej ξ z równania (2) i (3) powoduje, że zależność ta sprowadzana jest do jednego równania trzeciego rzędu w postaci:

$$\frac{km}{c_0}\ddot{\ddot{x}} + m\ddot{x} + k\frac{(c_0 + c)}{c_0}\dot{x} + cx + h = 0 \quad (5)$$

Równanie (5) przemnożono przez elementarne przemieszczenie $dx = \dot{x}dt$ i scałkowano w przedziale $t \in (0, t_k)$ na mocy, którego otrzymano:

$$\int_0^{t_k} \ddot{\ddot{x}}\dot{x}dt = \ddot{\ddot{x}}\dot{x}\Big|_0^{t_k} - \int_0^{t_k} \ddot{\ddot{x}}\dot{x}dt \quad (6)$$

Przyjmując następujące warunki początkowe dla $t = 0_+$ i $t = t_k$, czyli $\dot{x}(t_k) = v(t_k) = 0$ i $\dot{x}(0) = \alpha(0) = 0$ równanie (6) otrzymuje postać:

$$\int_0^{t_k} \ddot{\ddot{x}}\dot{x}dt = -\int_{v_0}^0 adv = \int_0^{v_0} adv = \beta \quad (7)$$

oraz pozostałe całki w postaci:

$$\int_0^{t_k} \ddot{\ddot{x}}\dot{x}dt = \int_{v_0}^{v(t_k)} vdv = \frac{v^2}{2}\Big|_{v_0}^0 = -\frac{v_0^2}{2} \quad (8)$$

$$\int_0^{t_k} \ddot{\ddot{x}}\dot{x}dt = \int_{x_0}^{x_M} vdx = \alpha \quad (9)$$

$$\int_0^{t_k} \dot{x}dt = \int_{x(0)}^{x(t_k)} dx = x\Big|_0^{x_M} = x_M \quad (10)$$

$$\int_0^{t_k} x \dot{x} dt = \int_{x_0}^{x(t_k)} x dx = \frac{x^2}{2} \Big|_0^{x_M} = \frac{x_M^2}{2} \quad (11)$$

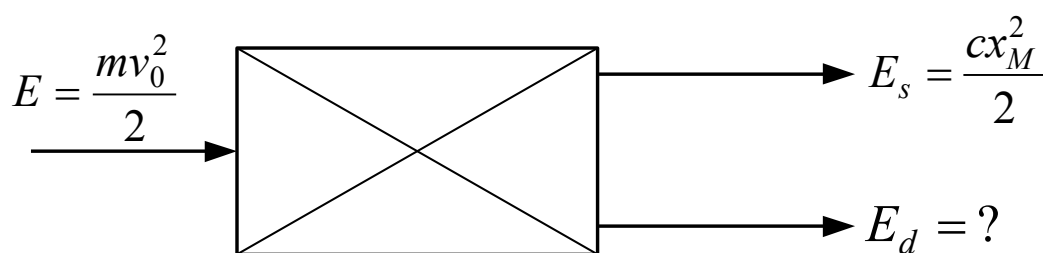
Po zsumowaniu zależności (7-11) na mocy równania (5) otrzymujemy następującą zależność:

$$\frac{km}{c_0} \beta - \frac{mv_0^2}{2} + k \frac{(c_0 + c)}{c_0} \alpha + \frac{cx_M^2}{2} + hx_M = 0 \quad (13)$$

Zależność (13) to postać energii bilansu w przedziale czasu uderzającego pocisku z energią $\frac{mv_0^2}{2}$, która podczas uderzenia zamieniana jest na energię sprężystą $\frac{cx_M^2}{2}$ oraz energię dysypacji E_d przedstawioną w postaci:

$$E_d = \frac{km}{c_0} \beta + k \frac{(c_0 + c)}{c_0} \alpha + hx_M \quad (14)$$

Najogólniej można to przedstawić za pomocą schematu blokowego:



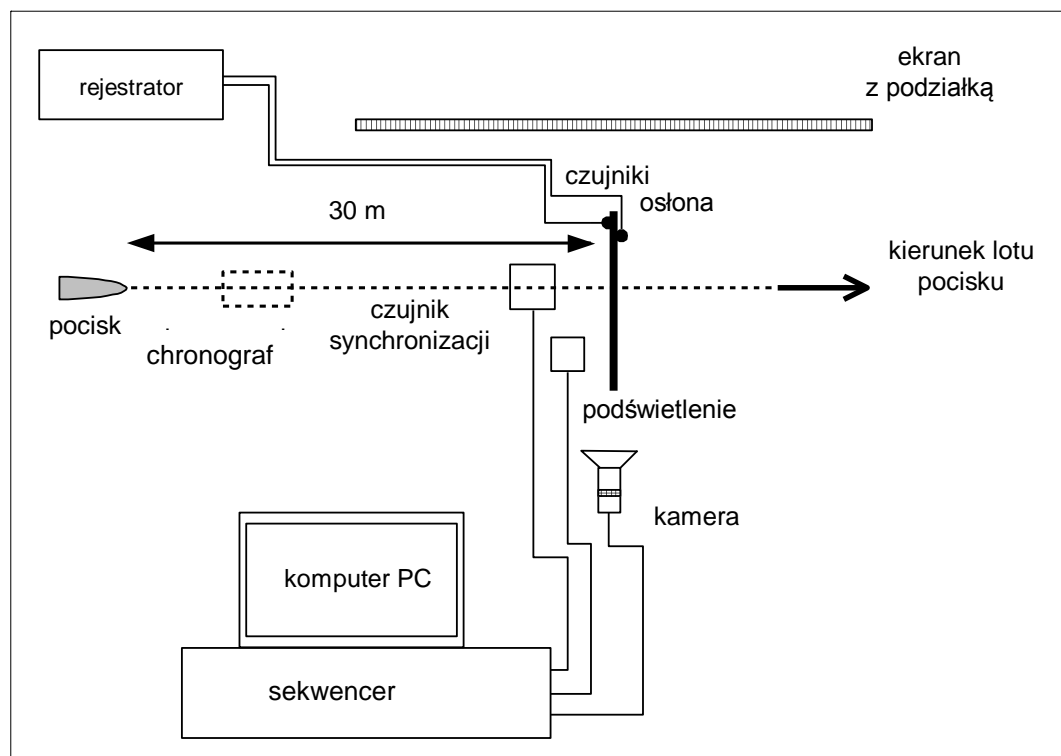
Rys. 2. Ujęcie schematyczne podziału energii uderzenia

3. ANALIZA BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

3.1. Stanowisko badawcze i zakres badań

Wyprowadzenie zależności na energię dysypacji w oparciu o analizowany zdegenerowany model dynamiczny było przesłanką do przeprowadzenia badań eksperymentalnych.

Zasadniczym celem badań było przeprowadzenie określonych czynności mogących zarejestrować parametry wnikania pocisku w osłonę balistyczną, jej zachowanie się w trakcie deformacji i możliwość opisu pewnych zjawisk fizycznych zachodzących na styku pocisk osłona balistyczna. W tym celu przeprowadzono próby poligonowe, rejestrując pewne wielkości fizyczne w ramach posiadanej aparatury pomiarowej. Schemat, według którego rejestrowano parametry uderzenia pocisku w osłonę przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Schemat stanowiska pomiarowego

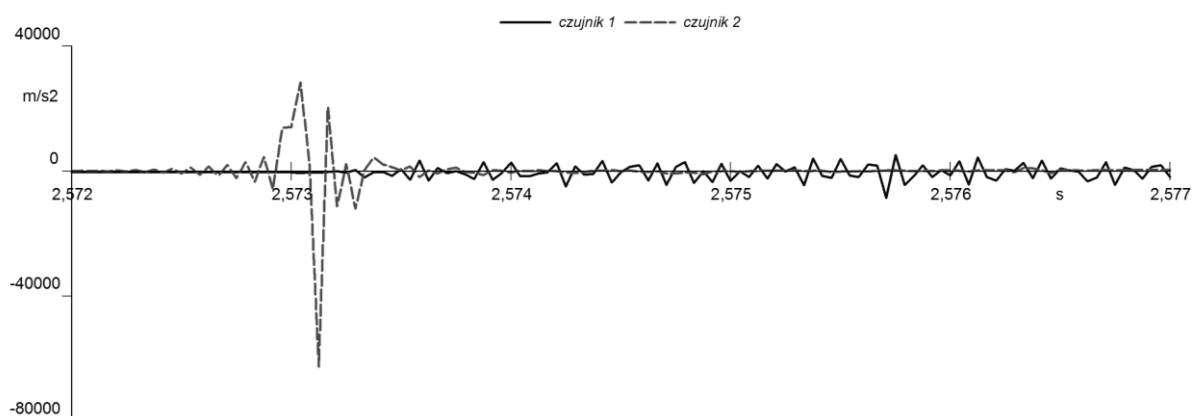
Ostrzał przeprowadzono amunicją przeciwpancerną typu 7,62x51mm z pociskiem AP, wykorzystując broń snajperską 7,62 mm karabin wyborowy ALEX o długości lufy 660 mm. Układ, do którego prowadzono ostrzał został wykonany w konfiguracji wielowarstwowej \neq 5mm blacha A600T i 10 mm laminat balistyczny na bazie włókien aramidowych o masie 11,45 kg. Układ ten został zamocowany w uchwytach jak pokazano na rys. 4.



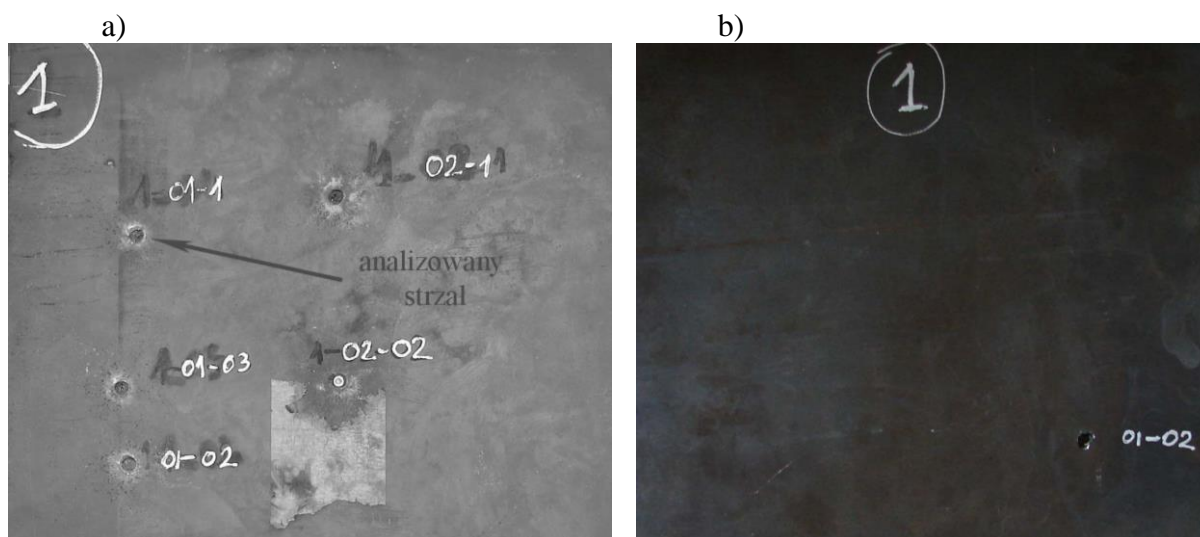
Rys. 4. Zamocowanie próbki i czujników przyspieszeń M350B21

3.2. Wyniki badań

W ramach ostrzału osłony zarejestrowano przebiegi przyspieszenia osłony w momencie uderzenia pocisku. Pomiar realizowano czujnikami umieszczonymi na ramie mocującej osłonę i w samej osłonie (rys. 4). Do tego celu wykorzystano czujniki PCB M350B21, zakres 1-10 000 Hz i amplitudzie 100 000 g. Sygnały zostały poddane obróbce w oprogramowaniu FlexPro, a przykładowe przebiegi dla strzału oznaczonego na próbce 1_01_1 przedstawiono na rys. 5. Kolorem niebieskim zaznaczono przebiegi rejestrowane na ramie, w której zamocowana była osłona balistyczna. Kolorem różowym rejestrowano przebiegi w osłonie. Ostrzału dokonano pociskiem 7,62x51mm AP z prędkością uderzenia 839 m/s. Masa pocisku przeciwpancernego to 10,7 g. Układ skutecznie pochłonął energię sprężystą i energię dysypacji (brak przestrzelenia) jak pokazano na rys. 6.



Rys. 5. Zarejestrowane przyspieszenia ramy i osłony w chwili uderzenia pociskiem dla strzału 1_01_1



Rys. 6. Widok ostrzelanej próbki:
a – frontowa strona osłony; b – tylna strona osłony

4. SZACOWANIE PARAMETRÓW

W wyniku przeprowadzonej analizy modelu dynamicznego procesu przestrzeliwania osłony balistycznej i zarejestrowanych parametrów eksperymentalnych na mocy równania (14) energię dysypacji E_d można zapisać w postaci:

$$E_d = E - E_s \quad (15)$$

gdzie: – energia E określana jako energia całkowita, to energia w chwili uderzenia pocisku z prędkością 839m/s. W naszym przypadku E wynosi 3765,98 J.

W celu określenia energii dysypacji dla analizowanego układu należy określić x_M , którego wielkość uzależniona jest od spadku prędkości pocisku w materiale. Wielkość ta definiowana jako α wyraża się zależnością:

$$\alpha = \int_{x_0}^{x_M} v dx \quad (16)$$

Przyjęto, że narastanie deformacji osłony jest liniowe (jest to dalekie uproszczenie) to dla tego warunku otrzymujemy zależność:

$$v(x) = v_0 - \gamma x \quad (17)$$

gdzie: $x = x_M \rightarrow v_0 - \gamma x_M = 0$, tak więc nasze $\gamma = \frac{v_0}{x_M}$.

Wobec powyższego poszukiwany współczynnik α wyraża się zależnością:

$$\alpha = \int_0^{x_M} (v_0 - \gamma x) dx = v_0 x - \gamma \frac{x^2}{2} \Big|_0^{x_M} = v_0 x_M - \gamma \frac{x_M^2}{2} = \frac{v_0 x_M}{2} \quad (18)$$

Współczynnik β wyraża się zależnością:

$$\beta = \int_0^{v_0} a dv \quad (19)$$

gdzie:

$$v(x) = v_0 - \gamma x = a$$

$$a = \dot{v} = \frac{d}{dt}(v_0 - \gamma x) = -\gamma \frac{dx}{dt} = -\gamma v$$

Poszukiwany współczynnik β ostatecznie przyjmie postać:

$$\beta = \int_0^{v_0} -\gamma v dv = -\gamma \frac{v^2}{2} \Big|_0^{v_0} = -\gamma \frac{v_0^2}{2} \quad (20)$$

Ostateczna wartość β wyraża się zależnością:

$$\beta = -\frac{v_0^3}{2x_M} \quad (21)$$

Znając wartości współczynników α , β , γ można przystąpić do identyfikacji parametrów c , c_0 , k , h modelu, które należy wyznaczyć doświadczalnie, stosując odpowiednie metody badawcze.

Tabela 1. Oszacowane parametry na podstawie analizy przestrzelenia układu kompozytowego

Lp	m	v_0	x	x_M	α	β	γ
1.	kg	m/s	mm	mm	m ² /s	m ² /s	1/s
2.	11,45	839	44,5	37,2	15,61	793803385,75	2255,38

5. PODSUMOWANIE

Omówione zagadnienie identyfikacji przebijania osłony balistycznej jest częścią prac dotyczących poszukiwania implementacji modeli zdegenerowanych do opisu tych zjawisk. Ujmując analityczne wyprowadzenia zależności proponowanego modelu, przedstawiono zależność całkowitej energii uderzenia, na dysypację energii rozpraszanej w osłonie i energii rozpraszanej sprężystości. W celu pełnej identyfikacji parametrów modelu zdegenerowanego należy wyznaczyć jego stałe (c , c_0 , k , h), co wymaga opracowania stosownych procedur, które są przedmiotem prac autorów, a ich wyniki będą publikowane.

Na tym etapie identyfikacji stwierdza się, że:

- energia sprężysta zależy od sztywności statycznej osłony;
- jej wartość w głównej mierze zależy od drogi zatrzymania pocisku w osłonie do kwadratu;
- energia dysypacji natomiast uzależniona jest przede wszystkim od prędkości uderzającego pocisku, co wpływa na wielkość x_m ;
- suma energii sprężystej i dysypacji nie powinna być wartością mniejszą od energii uderzenia, gdyż dojdzie do przestrzelenia osłony, a to w przypadku konstruowania bezpiecznych osłon jest niepożądane.

6. LITERATURA

- [1] STRONGE W. J.: Impact mechanics. Cambridge University Press 2000.
- [2] GRYBOŚ R.: Stateczność konstrukcji pod obciążeniem uderzeniowym. Warszawa – Poznań, PWN, 1980.
- [3] BOURKE P.: Ballistic impact on composite armour. Cranfield University 2007.
- [4] NAIK N. K., DOSHI A. V.: Ballistic impact behaviour of thick composites. Parametric studies. Composite Structures, Vol. 82, Iss. 3, 2008, pp. 447-464.

- [5] ÜBEYLI M., YILDIRIM R. O., ÖGEL B.: On the comparison of the ballistic performance of steel and laminated composite armors. *Materials and Design*, Vol. 28, Iss. 4, 2007, pp. 1257-1262.
- [6] HOSUR M. V., VAIDYA U. K., ULVEN C., JEELANI S.: Performance of stitched/unstitched woven carbon/epoxy composites under high velocity impact loading. Vol. 64, Iss. 3-4, 2004, pp. 455-466.
- [7] MAWEJA K., STUMPF W.: Fracture and ballistic-induced phase transformation in tempered martensitic low-carbon armour steels. *Materials Science & Engineering A*, Vol. 432, Iss. 1-2, 2006, pp. 158-169.
- [8] JACK C. Roberts, PAUL J. Biermann, JAMES V. O'Connor, EMILY E. Ward, RUSSELL P. Cain, BLISS G. Carkhuff, and ANDREW C. Merkle: Modeling Nonpenetrating Ballistic Impact on a Human Torso. *Johns Hopkins Apl Technical Digest*, Vol. 26, No. 1, 2005, pp. 84-92.
- [9] STEPHEN A. Van Albert, PAUL F. Bruney III: Development of a Ballistic Impact Detection System. RTO-MP-HFM-109, Symposium on "Combat Casualty Care in Ground Based Tactical Situations. Trauma Technology and Emergency Medical Procedures", USA, 2004, pp. 27-1÷27-22.
- [10] MAMIVAND M., LIAGHAT G. H.: A model for ballistic impact on multi-layer fabric targets. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, Iss. 7, 2010, pp. 806-812.
- [11] FELI S., AALAMI AALEAGHA, M. E., AHMADI Z.: A new analytical model of normal penetration of projectiles into the light-weight ceramic-metal targets. *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, Iss. 5, 2010, pp. 561-567.
- [12] KULISIEWICZ M.: Modeling and Identification of Nonlinear Mechanical Systems under Dynamic Complex Loads. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2005.
- [13] PIESIAK S.: Identyfikacja układów mechanicznych w dziedzinie nieliniowych zdegenerowanych modeli dynamicznych. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2003.
- [14] JAMROZIAK K.: Process Description of piercing when using a degenerated model. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 26, Iss. 1, International OCOSCO World Press, 2008, pp. 57-64.
- [15] BOCIAN M., JAMROZIAK K., KULISIEWICZ M.: Determination of the chain-like non-linear multi-degree-of-freedom systems constant parameters under dynamical complex loads. *The Journal PAMM*, Vol. 9, Iss. 1, Copyright © 2009 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim 2010, pp. 397-398.
- [16] JAMROZIAK K., BOCIAN M., KULISIEWICZ M.: Przykłady zastosowań nieklasycznych modeli sprężysto-tłumiących w procesie uderzenia balistycznego. *Modelowanie Inżynierskie*, 40, Gliwice, 2010, s. 95-102.

EVALUATION OF A COMPOSITE SYSTEMS' PIERCING WITH THE USE OF DEGENERATED MODELS

Abstract: This paper describes the model of piercing a ballistic shield's composite system with small arms' projectile. Based on selected results of empirical tests, the author verified mathematical model of piercing effect. The identification was summed-up with conclusions.

Keywords: analysis and modeling, ballistic shields, piercing test, composites, degenerated models.