

**POSTĘPY W INŻYNIERII MECHANICZNEJ
DEVELOPMENTS IN MECHANICAL ENGINEERING**

7(4)/2016, 57-65

Czasopismo naukowo-techniczne – Scientific-Technical Journal

Michał STOPEL, Dariusz SKIBICKI, Jakub RUSZKOWSKI

**ANALIZA NUMERYCZNA TESTU
BALISTYCZNEGO POCISKU KALIBRU 7.92 × 33**

Streszczenie: W pracy przedstawiono analizę numeryczną testu balistycznego pocisku kalibru 7,92 × 33 przeprowadzoną na podstawie wytycznych norm opracowanych przez niemieckie towarzystwo VPAM. Test balistyczny polegał na penetracji przez pocisk płyty stalowej, wykonanej ze stali Weldom 700E o grubości 8 mm, w zależności od kąta natarcia. Analiza numeryczna dotyczyła weryfikacji literaturowych danych dotyczących kąta natarcia pocisku i skutecznej penetracji płyty stalowej.

Słowa kluczowe: LS-Dyna, test balistyczny, pocisk, prędkość odkształcenia

1. WSTĘP

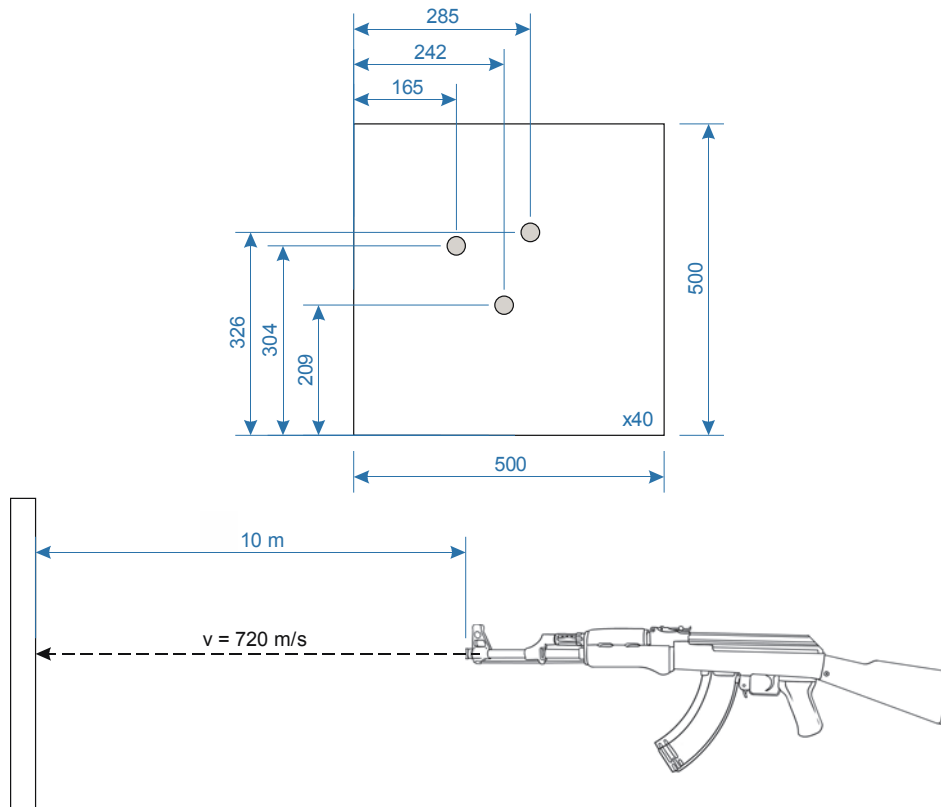
Norma VPAM PM 2007 określa warunki prowadzenia badań eksperymentalnych podczas oceny przydatności materiałów stosowanych do ochrony ludzi oraz obiektów przeciwko pociskom wystrzeliwanym z broni ręcznej i karabinów. Norma mówi, że testowane płyty powinny minimalizować penetrację pocisków bądź ich odłamków przy uderzeniu pod kątem 90 stopni. Na rysunku 1 graficznie przedstawiono warunki prowadzenia eksperymentu na podstawie wytycznych przytoczonej normy.

Na potrzeby prowadzonych badań przygotowano trzy symulacje numeryczne, w których kąt pomiędzy torem pocisku a płaszczyzną płyty wynosił 90, 60 oraz 45 stopni, co schematycznie zaprezentowano na rysunku 2. Zapropozowane symulacje pozwalają zweryfikować literaturowe doniesienia, mówiące o tym, że przy odpowiednim kącie natarcia (dla rozpatrywanego przykładu $\alpha = 45^\circ$) nie dochodzi do skutecznej penetracji blachy stalowej przez pocisk.

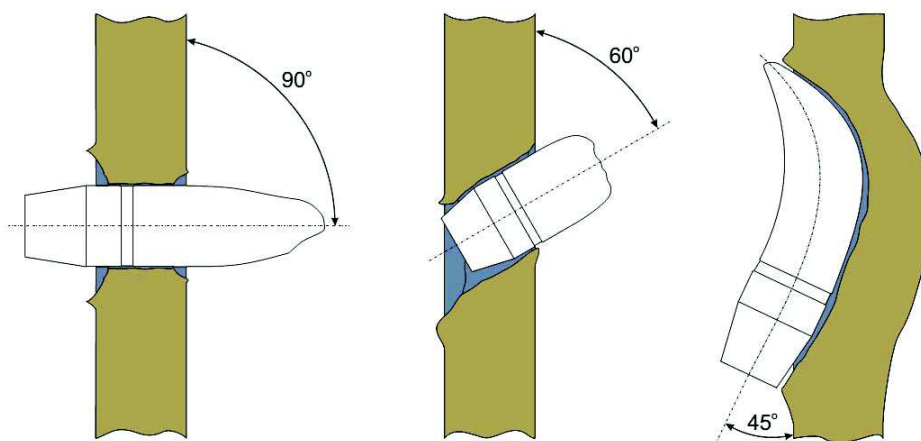
Przyjęty typ pocisku nie jest obecnie stosowany i przyjęty został jako model dla analizy numerycznej jego prędkość początkową określono na podstawie normy VPAM APR 2006. Przyjęta prędkość początkowa pocisku wynosiła $690 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Należy przy tym zaznaczyć, że nie uwzględniono w analizie spadku prędkości wynikającego z oporów powietrza.

mgr inż. Michał STOPEL, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: michal.stopel@utp.edu.pl
dr hab. inż. Dariusz SKIBICKI prof. nadzw. UTP, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: dariusz.skibicki@utp.edu.pl

Jakub RUSZKOWSKI, Wydział Inżynierii Mechanicznej, e-mail: jakub.ruszkowski86@gmail.com



Rys. 1. Schemat analizy balistycznej w oparciu o normę VPAM PM 2007
Fig. 1. Diagram of ballistic analysis in accordance with VPAM PM 2007



Rys. 2. Schemat prowadzonej analizy balistycznej w odniesieniu do normy VPAM PM 2007
Fig. 2. Diagram of ballistic analysis in accordance with VPAM PM 2007

2. ZJAWISKA WYNIKAJĄCE Z WRAŻLIWOŚCI MATERIAŁU NA PRĘDKOŚĆ ODKSZTAŁCENIA

Podczas odkształcania materiału ze znaczną prędkością obserwuje się wzrost wartości naprężenia uplastyczniającego. Ze względu na bardzo krótki czas trwania procesu odkształcania materiału poddanego obciążeniom związanym z uderzeniem pocisku przemiana cieplna ma charakter izotermiczny, a nie jak w przypadku odkształcenia z prędkościami quasi-statycznymi charakter adyabatyczny.

Uwzględnienie opisanych zjawisk, tj. umocnienia postaciowego, umocnienia wynikającego z wrażliwości na prędkość odkształcenia oraz osłabienia termicznego jest niezwykle istotne podczas prowadzenia analiz numerycznych testów balistycznych.

W środowiskach numerycznych pozwalających na przeprowadzenie analiz typu *explicite* często dostępne są modele materiałowe, które powyższe zjawiska pozwalają uwzględnić w trakcie prowadzenia obliczeń. Jednym z takich środowisk jest LS-Dyna. Spośród zaimplementowanych tam modeli materiałowych wybrano model opracowany przez G.R. Johnsona i W.H. Cooka, którego zapis matematyczny przedstawia się następująco:

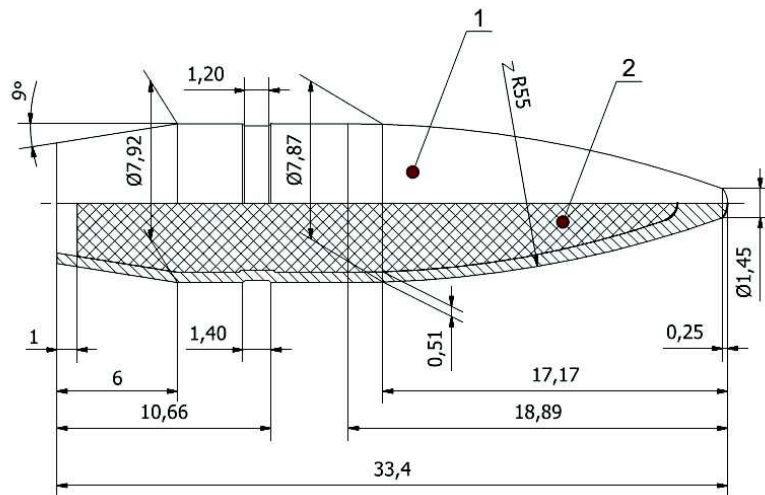
$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C\ln\dot{\varepsilon}^*)(1 - T^{*m}) \quad (1)$$

gdzie:

- σ – naprężenie,
- A – granica,
- B – moduł umocnienia postaciowego,
- C – współczynnik wrażliwości na prędkość odkształcenia,
- n – wykładnik umocnienia postaciowego,
- m – wykładnik osłabienia termicznego,
- ε – ekwiwalentne odkształcenie plastyczne,
- $\dot{\varepsilon}^*$ – bezwymiarowa prędkość odkształcenia dla $\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon} / \dot{\varepsilon}_0$,
- $\dot{\varepsilon}_0$ – minimalna prędkość odkształcenia $1,0 \text{ s}^{-1}$,
- T^* – temperatura homologiczna (temp. pokojowa / temp. topnienia).

3. OBIEKT BADAŃ

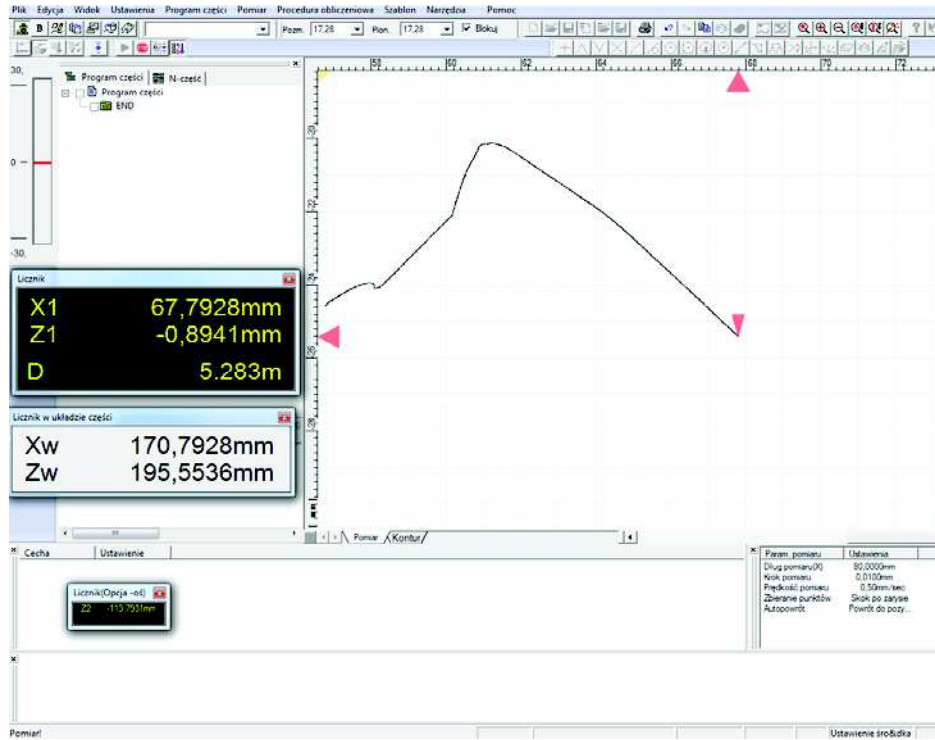
Do analizy numerycznej wykorzystano pocisk kalibru $7,92 \times 33$ (rys. 3). Pocisk składa się ze stalowego rdzenia oraz miedzianego płaszczka. Dokładne pomiary geometrii dokonano z wykorzystaniem profilometru Formtracer SV-C3200 (rys. 4). Zmierzony profil zewnętrzny posłużył do utworzenia modelu przestrzennego pocisku w środowisku CAD, który następnie został zdyskretyzowany siatką elementów skończonych. Geometrię oraz zdjęcie pocisku przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Geometria pocisku kalibru 7,92 × 33 oraz obiekt rzeczywisty
Fig. 3. Geometry of bullet cal. 7,92 × 33 and real object

Stałe dla modelu materiałowego pozyskano z literatury [1]. Samodzielne wyznaczenie stałych dla poszczególnych elementów wiąże się z prowadzeniem szeregu prób wytrzymałościowych z różnymi prędkościami odkształcenia, w tym z próbami o charakterze dynamicznym np. z zastosowaniem dzielonych prętów Hopkinsona, dlatego w przypadku przygotowywania tej analizy przeprowadzono przegląd literaturowy i zdecydowano się na wykorzystanie stałych, które były już zweryfikowane [1, 2]. Zebrane wartości odpowiednich współczynników przedstawiono w tabeli 1.

Pocisk uderzał w płytę stalową o grubości 8 mm wykonaną ze stali Wedlox 700E. Podobnie jak w przypadku pocisku stałe modelu materiału pozyskane zo- stały z literatury (tab. 1).



Rys. 4. Pomiar geometrii z wykorzystaniem profilometru Formtracer SV-C3200
 Fig. 4. Geometry measurement with the use of profilometer Formtracer series SV-C3200

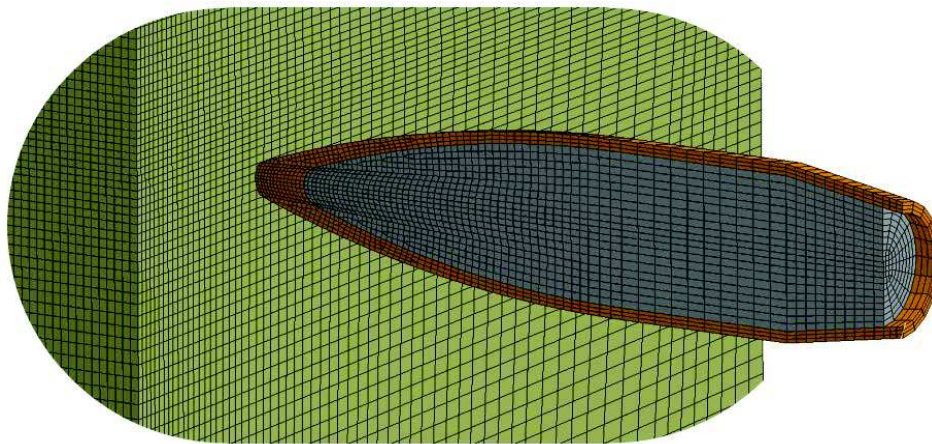
Tabela 1. Stałe materiałowe dla modelu Johnsona-Cooka [1]
 Table 1. Material data for Johnson-Cook's model [1]

	Granica plastyczności	Umocnienie postaciowe			Umocnienie od prędkości odkształcenia		Osłabienie temperaturowe		
	$\sigma_{0,2}$	A	B	n	C	$\dot{\epsilon}_0$	Tr	Tm	m
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	--	--	[s ⁻¹]	[K]	[K]	--
Wedlox 700E	819	819	308	0.64	0.0098	5E10 ⁻⁴	293	1800	1.0
Miedziany płaszcz	206	206	505	0.42	0.01	5E10 ⁻⁴	293	1189	1.68
Stalowy rdzeń	1200	1200	50	1.0	0	5E10 ⁻⁴	293	1800	1.0

4. MODEL NUMERYCZNY

4.1. Model pocisku

Model numeryczny pocisku (rys. 5) składa się z dwóch osobnych elementów: płaszcza i rdzenia. W obu przypadkach do odwzorowania geometrii obiektów wykorzystano elementy bryłowe, przestrzenne typu Solid. Elementy te mają trzy stopnie swobody, odpowiadające przemieszczeniom translacyjnym względem osi kartezjańskiego układu współrzędnych. Opisuje je funkcja kształtu pierwszego rzędu. Sumaryczna liczba elementów składająca się na siatkę płaszcza pocisku wynosi 3142, natomiast rdzenia 5484. Dla elementów zdefiniowano kartę *Section_Solid z jednym punktem całkowania [3].



Rys. 5. Siatka elementów skończonych
Fig. 5. Mesh of finite elements

4.2. Model płyty

Płytę podobnie jak elementy pocisku zamodelowano z wykorzystaniem elementów typu Solid. Grubość płyty wynosiła 8 mm. Na jej grubości rozmieszczono 20 rzędów elementów. Łączna liczba elementów składających się skończonych wynosiła 163 840.

4.3. Warunki brzegowe i kontakty

Podczas analizy przyjęto, że model jest symetryczny względem płaszczyzny prostopadłej do osi pocisku, co znacznie skraca czas obliczeń poprzez redukcję liczby elementów skończonych. Płyta utwierdzona była na zewnętrznych powierzchniach poprzez odebranie zarówno translacyjnych stopni swobody, jak i odebranie możliwości obrotu w węzłach elementów. Zmienny był kąt ustawienia płaszczyzny czołowej płyty względem kierunku natarcia pocisku.

We wszystkich węzłach zdyskretyzowanego pocisku z zastosowaniem karty *Velocity_Generation [3] przypisano prędkość początkową wynoszącą

720 m·s⁻¹. Ze względu na przyjęcie symetryczności modelu odstąpiono od nadania pociskowi początkowego ruchu obrotowego względem własnej osi.

Pomiędzy poszczególnymi częściami modelu zdefiniowano kontakt `Eroding_nodes_to_surface` [3]. Jest to kontakt pomiędzy węzłami a segmentami elementów skończonych. Pozwala na szukanie kontaktujących się elementów, gdy inne ulegną zniszczeniu w momencie przekroczenia warunków wytrzymałościowych.

4.4. Kryterium uszkodzenia

Korzystając z zweryfikowanych danych materiałowych [1, 2, 6] przyjęto kryterium uszkodzenia znane jako kryterium Cockrofta-Lathama. Kryterium to opiera się na pracy wykonanej w zakresie plastycznym w jednostkowej objętości i wyraża się wzorem:

$$D = \frac{W}{W_{cr}} = \frac{1}{W_{cr}} \int_0^{\varepsilon_f} \langle \sigma_1 \rangle d\varepsilon_{eq} \quad (2)$$

gdzie:

- D – wartość uszkodzenia, dla D = 1 element jest usuwany z analizy,
- W – praca wykonana przez odkształcenie plastyczne w jednostce objętości,
- W_{cr} – wartość krytyczna pracy,
- σ₁ – naprężenia główne,
- ε_{eq} – odkształcenie ekwiwalentne wg Hubera-Misesa.

Opisując zachowanie materiału z zastosowaniem modelu Johnsona-Cooka (1), można skorzystać z kryterium opracowanego dla tego modelu podając odpowiednie stałe D₍₁₋₅₎. Ze względu na fakt, że stałe te jest znacznie trudniej opracować, a cały proces jest zdecydowanie bardziej czasochłonny, natomiast zasadność stosowania kryterium uszkodzenia Cockrofta-Lathama została zweryfikowana we wcześniejszych badaniach, zdecydowano się pozostać przy tym kryterium.

Należy zauważyć, że elementy ulegały dodatkowo erozji, ze względu na przekroczenie temperatury topnienia dla poszczególnych materiałów, z których zostały wykonane (wartości temperatury topnienia zostały ujęte w tabeli 1).

Stałe dla kryterium wg Cockroft'a-Latham'a uszkodzenia elementów zebrano w tabeli 2.

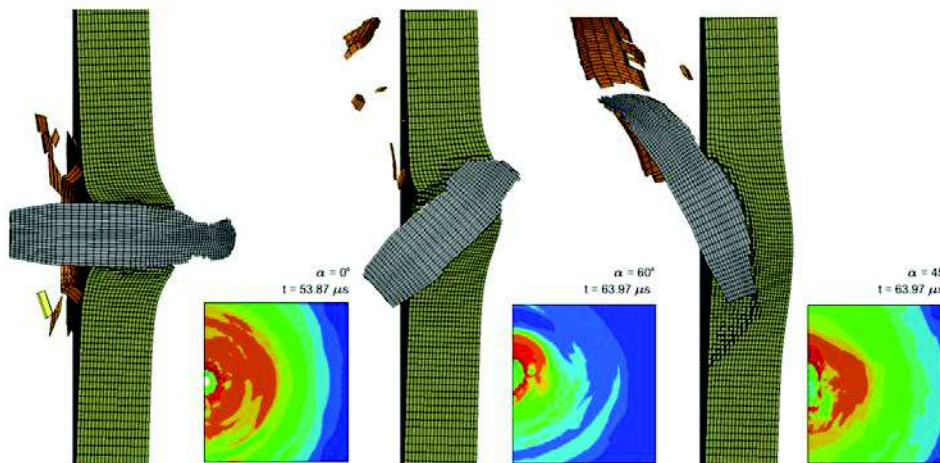
Tabela 2. Stałe dla kryterium uszkodzenia [1]

Table 2. Data for damage criterion [1]

	W _{cr}
Weldox 700E	1486
Miedziany płaszcz	914
Stalowy rdzeń	---

5. ANALIZA SYMULACJI NUMERYCZNYCH

Rezultaty analiz numerycznych wykonanych dla poszczególnych przypadków przedstawiono na rysunku 6. W wyniku analizy wykazano, że w przypadku kąta natarcia równego 90 oraz 60 stopni doszło do przebicia blachy. Widać, że wraz ze zmniejszaniem się kąta natarcia wzrasta „grubość skuteczna” płyty, co w konsekwencji w przypadku kąta natarcia równego 45 stopni – gdzie grubość materiału, którą ma pokonać pocisk wynosiła 11,3 mm – nie doszło do penetracji stalowej płyty. Na fakt, że stalowa płyta nie została przebita pociskiem uderzającym pod kątem 45 stopni ma również wpływ zależność pomiędzy geometrią pocisku a kątem ustawienia przegrody, w takim wypadku może dojść do rykoszetowania – co wynika z rozkładu wektora prędkości na składowe. Elementy pocisku erodowały głównie ze względu na kryterium związane z przekroczeniem temperatury topnienia dla przypisanego materiału. Elementy płyty erodowały głównie ze względu na przekroczenie krytycznej wartości pracy ujętej w kryterium Cockrofta-Lathama. Analizując obraz map naprężeń można zauważyć, że naprężenie, jak i odkształcenie przemieszcza się w objętości materiału w postaci fali, co wynika z dynamicznego charakteru przyłożonego obciążenia.



Rys. 6. Penetracja płyty stalowej przez pocisk oraz mapa naprężeń na płycie
 Fig. 6. Penetration of steel plate by a projectile and a map of stress on the plate

6. WNIOSKI

Uzyskano zgodność otrzymanych wyników z danymi pozyskanymi z literatury. Wykorzystane stałe modelu, sposób odwzorowania kontaktów pomiędzy elementami oraz warunki brzegowe mogą posłużyć do prowadzenia innego typu analiz takich jak na przykład uderzenia pocisku w drzwi pojazdu bądź barier mających stanowić osłonę przed pociskami. Przygotowane w ten sposób symulacje należałoby zweryfikować poprzez badania eksperymentalne. Takie po-

równanie pozwoliłoby na walidację modelu numerycznego. Dodatkowo autorzy podjęli próbę wyznaczenia stałych modelu materiałowego wykorzystując młot udarowy Charpy'ego [4, 5]. Porównanie wyników przeprowadzonej symulacji uderzenia pocisku dla stałych literaturowych oraz stałych wyznaczonych z zastosowaniem metody opracowanej przez autorów pozwoli zweryfikować poprawność wyznaczonych współczynników.

LITERATURA

- [1] BORVIK T., DEY S., CLAUSE A.H.: Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *Int. Journal of Impact Engineering* 36, 2008, 948-964.
- [2] FLORES-JOHNSON E.A., SALEH M.: Ballistic performance of multi-layered metallic plates impacted by a 7.62-mm APM2 projectile. *Int. Journal of Impact Engineering* 38(12), 2011, 1022-1032.
- [3] LS-DYNA Keyword User's Manual Volumes I and II, Sierpień 2012, Wersja 971 R6.1.0, Livermore Software Technology Corporation.
- [4] STOPEL M., SKIBICKI D.: Verification of the Charpy Impact Test Capability to Determine the Constants of the Johnson-Cook Model. *Solid State Phenomena* 250, 2016, 197-202.
- [5] STOPEL M., SKIBICKI D., MOĆKO W.: Verification of FEM Modelling Capabilities Allowing for the Effects of Strain Rate. *Solid State Phenomena* 250, 2016, 203-208.
- [6] TRIA D.E., TRĘBIŃSKI R.: On the Influence of Fracture Criterion on Perforation of High-Strength Steel Plates Subjected to Armour Piercing Projectile. *Archive of Mechanical Engineering* 62(2), 2015, 157-179.

NUMERICAL ANALYSIS OF A BALLISTIC TEST OF A BULLET CAL. 7.92 × 33

Summary: This paper presents some ways of modeling the bullet impact in the LS-Dyna. An attempt was made to verify the literature data the angle of impact of the projectile with the effective penetration of steel plate.

Key words: LS-Dyna, ballistic test, bullet, strain rate