

ODPORNOŚĆ NA PRZEBICIA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH

Konstrukcjom, które przenoszą obciążenia dynamiczne i których odporność decyduje o życiu i bezpieczeństwie człowieka stawia się szczególne wymagania. Wymagania dotyczą zarówno sfery materiałowej jak i konstrukcyjnej. To z kolei zmusza do poszukiwania optymalnych metod obliczeniowych, z uwzględnieniem nieliniowości, tak geometrycznej jak i fizycznej, wynikającej z konfiguracji struktury konstrukcji. Przykładem są różne konstrukcje balistyczne (osłony balistyczne), które są uderzane pociskami w których skumulowana jest ogromna energia. W takim przypadku uderzenie w tarczę (osłonę) pociskiem można rozpatrywać jako obciążenie spowodowane uderzeniem masą. Matematycznie zjawiska obciążeń przy dużych szybkościach odkształceń opisuje się różnymi modelami. Aparat matematyczny jest dość złożony ponieważ wymagana jest duża liczba „współczynników”, ponadto uzyskane wyniki badań nie zawsze są powtarzalne i ma na to wpływ wiele czynników. W pracy zaprezentowano wyniki przestrzeliwania tarcz wielowarstwowych z materiałów kompozytowych pociskami kalibru 7,62 mm. Tarcza składała się z trzech warstw, warstwy zewnętrzne stanowiły okładziny stalowe lub aluminiowe, warstwę wewnętrzną stanowiło drewno naturalne lub modyfikowane. Próbkę w kształcie tarcz były o średnicy 50 mm i różnej grubości. Wyniki badań pozwoliły ocenić wpływ modyfikacji drewna na jego odporność na przebicia.

WSTĘP

Badania udarowe i balistyczne mają na celu określenie podatności materiałów zastosowanych na konstrukcje jedno/wielowarstwowe, które spowodują zaabsorbowanie energii pocisku. Badania takie przeprowadza się na młocie udarowym, młocie opadowym oraz specjalnie w tym celu przygotowanym stanowisku służącym do przestrzeliwania materiałów pociskami. Odpowiednio wyposażone stanowisko umożliwia pomiar prędkości pocisku przed i za próbką (pomiar energii), kąt wychylenia wahadła w chwili „penetracji” badanej próbki pociskiem i pomiar siły oporu jaką stawia próbka pociskowi (pomiar dynamometrem).

Przy wysokich szybkościach odkształcenia wpływ wytrzymałości materiału jest w pierwszym przybliżeniu pomijalnie mały, a pocisk penetruje w tarczę podobnie do strumienia cieczy. Tak więc pocisk penetruje w tarczę przy prawie „ustalonym przepływie” i dynamicznej równowadze ciśnienia na czole pocisku [11]. Na podstawie badań literaturowych najczęściej stosowanymi modelami do opisu zderzeń ciał poruszających się z prędkościami 1000 m/s, są modele konstytutywne Hubera - Missesa i Johnsona-Cooka. Wynik symulacji oczywiście jest zależny od zastosowanego modelu konstytutywnego, ale przede wszystkim od znajomości niezbędnych współczynników dla danego modelu. Konstytutywny model Johnsona-Cooka przedstawiony w wielu pracach, jest jednym z podstawowych modeli stosowanych w numerycznych rozwiązaniach problemów, w których występują uderzenia z dużymi szybkościami odkształcenia w zakresie plastyczności. W układzie tarcza – pocisk, część energii kinetycznej pocisku jest zamieniana na pracę odkształcenia, a część ulega dyssypacji (tłumienie, tarcie, emitowanie w postaci ciepła). Ponadto na styku dwóch ciał pocisk – tarcza występuje zjawisko kontaktowe. Rozwiązanie tego zagadnienia wymaga zastosowania zaawansowanych metod obliczeniowych metody elementów skończonych oraz przyjęcie właściwego modelu zachowania się materiału [Jamrozik, 5, 8, 10]. Spośród modeli nieliniowego zachowania się materiału w procesie odkształcania należy wymienić [12]:

- a) sprężysto - plastyczny (bilinearny),
- b) sprężysto – plastyczny (multiliner),

- c) sprężysto – idealnie plastyczny,
- d) sztywno – plastyczny,
- e) sztywno – idealnie plastyczny,

Przy opisie należy mieć na uwadze dynamiczne własności materiału wynikające z tzw. umocnienia z prędkością odkształcenia, powodującego ilościowe zmiany zachodzące w materiale. Obszerny przegląd metod zamieszczono w pracy [12, 13]. Szybkość umocnienia $\dot{\epsilon}$ materiału rozkłada się na sprężystą prędkość umocnienia $\dot{\epsilon}_{el}$ oraz lepkoplastyczną prędkość umocnienia $\dot{\epsilon}_{pl}$ [12]:

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}_{el} + \dot{\epsilon}_{pl} \quad (1)$$

Zmienna $\dot{\epsilon}_{pl}$ jest postaci:

$$\dot{\epsilon}_{pl} = \gamma \left[\frac{\langle f \rangle}{\bar{\sigma}_0} \right]^N \frac{\partial f}{\partial \sigma} \quad (2)$$

gdzie:

γ i N – stałe materiałowe,

f – jest funkcją płynięcia Hubera – Missesa.

Napężenie uplastycznione opisane jest równaniem:

$$\bar{\sigma} = \langle \bar{\sigma}_0 + h_p \kappa \rangle \quad (3)$$

gdzie:

$\bar{\sigma}_0$ – statyczna granica plastyczności,

κ – ekwiwalentne odkształcenie lepkoplastyczne,

h_p – parametr umocnienia ($h_p > 0$) lub osłabienia ($h_p < 0$).

Funkcja $\langle f \rangle$ przyjmuje następujące wartości:

$$\langle f \rangle = \begin{cases} f & \text{dla } f \geq 0 \\ 0 & \text{dla } f < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Stosując metodę elementów skończonych do modeli umocnienia z prędkością odkształcenia zalecany jest [12]:

1. Model Cowpera – Symonds [13, 14],

$$\sigma = \bar{\sigma}_0 \left[1 + \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{D} \right)^{\frac{1}{p}} \right], \quad (5)$$

2. model Johnsona – Cooka [15, 16, 17],

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon^n) \left[1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T} \right)^m \right] (1 + C \ln \dot{\varepsilon}). \quad (6)$$

gdzie:

T_r – temperatura odniesienia (temperatura pokojowa),

T_m – temperatura topnienia, A, B, C, m, n – stałe.

W równaniu (6) naprężenie zależy od stopnia umocnienia materiału, szybkości odkształcenia oraz temperatury. Stałe w równaniu (6) można dobrać z literatury dla danego rodzaju materiału [16, 18]. Pozostałe modele obszernie zostały zaprezentowane w pracy [12].

Problem opisu zjawisk zachodzących przy bardzo dużych szybkościach odkształceń jest złożony i w tej pracy nie został zaprezentowany.

Przeprowadzone badania odporności udarowej próbek wielowarstwowych zarówno z materiałów kompozytowych [1] jak i metalicznych [10], wykazały ich większą odporność aniżeli próbek jednowarstwowych.

W dostępnej literaturze brakuje danych odnośnie odporności udarowej materiałów drzewnych oraz zastosowaniu materiałów drewnopodobnych jako składnika osłon o podwyższonej ułamko- i kuloodporności. W takich konstrukcjach jak mosty stacjonarne, mosty składane, schrony, elementy wyposażenia jednostek pływających, drewno występuje niekiedy jako materiał podstawowy lub uzupełniający. Materiał ten może być kombinacją z innymi materiałami i stanowić solidną osłonę. Ponadto wyniki badań pozwolą na określenie zachowania się drewna modyfikowanego poddanego bardzo dużym szybkością odkształceń.

Celem niniejszego artykułu jest określenie właściwości balistycznych drewna naturalnego i modyfikowanego podczas przestrzeliwania próbek tarczowych o średnicy 50 mm i różnej grubości pociskami kalibru 7,62 mm. Do badań wykorzystano drewno modyfikowane K0,48 (cyfra oznacza ilość kg polimetakrylanu metylu (PMM) na kg drewna suchego). Technologia i właściwości materiału opisano w pracach [4 ÷ 9]. Zdolność poszczególnych typów próbek do pochłaniania energii kinetycznej pocisku może stanowić miarę ich odporności balistycznej i podstawę do oceny ich przydatności przy konstruowaniu osłon o podwyższonej ułamko- i kuloodporności.

1. MATERIAŁ BADAWCZY

Badania przeprowadzono na naturalnym i modyfikowanym powierzchniowo drewnie sosnowym. Zasadniczym celem było określenie wpływu polimeru zawartego w strukturze drewna na spowolnienie przebiccia osłony z drewna modyfikowanego w stosunku do osłony z drewna naturalnego.

Badaniom poddano próbki trójwarstwowe, przy czym warstwy zewnętrzne wykonano ze stopu aluminium i/lub ze stali kadłubowej, natomiast warstwę wewnętrzną stanowiło drewno. Próbki miały kształt okrągłych o średnicy 50 mm. Grubości warstw zewnętrznych były równe grubością blach z których zostały wycięte, tj. 6 mm i 12 mm. Warstwy pośrednie z drewna sosnowego i modyfikowanego drewna sosnowego były o grubości 16 mm (rys. 1). Poszczególne

warstwy połączone były za pomocą kleju na bazie żywicy „Polimal”. W tab. 1 – 4 podano podstawowe parametry stopów aluminium, stali i drewna.

Tab. 1. Parametry warstw ze stopu AlZn5Mg2CrZr

Dane z atestu			Wartości pomierzone		
Grubość, mm	R_m , MPa	$R_{0,2}$, MPa	Grubość, mm	Twardość KCV30	Gęstość, kg/m ³
6	415	367	6,32	93,5	2760
12	423	378	11,75	122,5	2730

Tab. 2. Parametry warstw ze stali kadłubowej kategorii A [2]

Dane z atestu			Wartości pomierzone		
Grubość, mm	R_m , MPa	R_e , MPa	Grubość, mm	Twardość KCV30	Gęstość, kg/m ³
6	510	325	6,35	133	7640
12	490	230	12,08	160	7730

Tab. 3. Właściwości mechaniczne drewna sosnowego

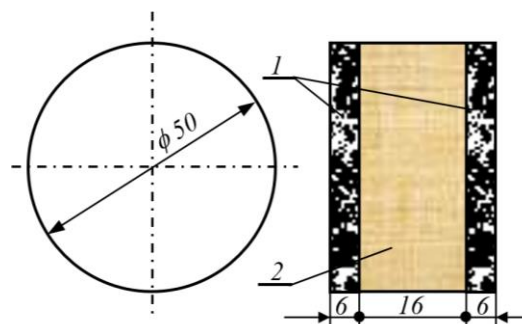
Dane z badań			Wartości pomierzone	
Grubość, mm	R_m , MPa	$R_{0,2}$, MPa	Twardość KCV30	Gęstość, kg/m ³
16	95	-	50	560

Tab. 4. Właściwości mechaniczne drewna modyfikowanego K0,48

Dane z badań			Wartości pomierzone	
Grubość, mm	R_m , MPa	$R_{0,2}$, MPa	Twardość KCV30	Gęstość, kg/m ³
16	112	-	120	850

2. BADANIA WŁASNE I WYNIKI BADAŃ

Badania przeprowadzono na stanowisku, które zostało zaprojektowane i jest własnością Akademii Marynarki Wojennej. Stanowisko jest wahadłem balistycznym z pełnym oprzyrządowaniem pozwalającym na określenie prędkości pocisku przed i za próbką (pomiar energii), kąta wychylenia wahadła w chwili „penetracji” badanej próbki pociskiem i pomiar siły oporu jaką stawia próbka pociskowi (pomiar dynamometrem). Szczegółowy opis stanowiska przedstawiono w pracy [3]. Na rys. 1 przedstawiono kształt i wymiary próbki, którą stosowano w badaniach.



Rys.1. Kształt i wymiary próbki do badań balistycznych, 1 – stal lub stop aluminium, 2 – drewno naturalne lub modyfikowane

W tab. 5 przedstawiono wyniki przebijalności próbek trójwarstwowych ze stali/stopu aluminium oraz drewna naturalnego/modyfikowanego.

Tab. 5. Wyniki badań balistycznych

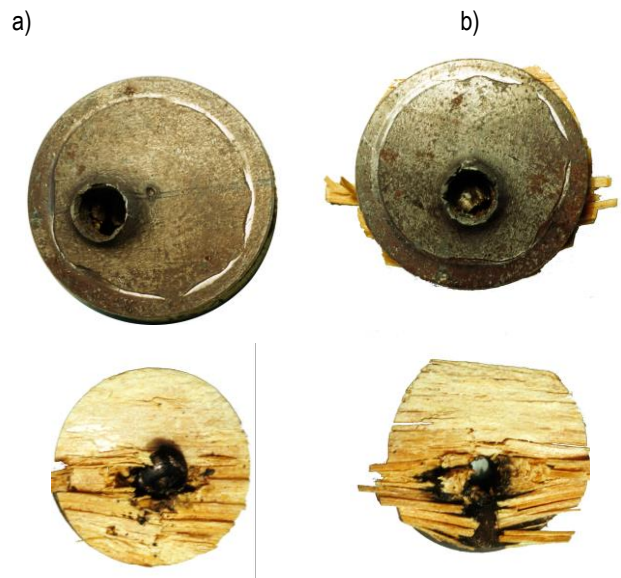
Nr Serii	Rodzaj próbki			Nr próbki	Prędkość pocisku		Kąt wych. waha. ϕ deg	Siła uderzenia	
					przed próbką	za próbką		maks.	min.
					V_0 m/s	V_k m/s		F_{smax} kN	F_{rmin} kN
1	2	3	4	5	6	7	8		
1	6 St	16 DS	6 St	24.1	806,45	380,85	7	58,72	-22,26
				24.2	862,06	404,78	7	50,62	-19,23
				24.3	793,65	376,97	6,5	53,66	-17,20
				średnia	820,72	387,53	6,83	54,33	-19,56
2	6 St	16 DM	6 St	36.1	877,2	444,78	8	65,81	-28,56
				36.2	892,85	384,53	8,5	73,92	-32,34
				36.3	885,65	420,56	8	68,85	-33,43
				średnia	885,23	416,62	8,16	69,52	-31,44
3	6 Al	16 DS	6 Al	28.1	851,06	791,25	1,7	14,79	-5,79
				28.2	888,87	755,54	2	22,90	-6,55
				28.3	888,89	775,54	1,7	20,44	-6,58
				średnia	876,28	774,11	1,80	19,37	-6,30
4	6 Al	16 DM	6 Al	31.1	869,6	724,28	2,9	42,32	-19,90
				31.2	909,09	714,22	2,9	39,08	-17,92
				31.3	888,89	676,66	2,4	35,03	-16,30
				średnia	887,19	705,05	2,73	38,81	-18,04
5	6 Al	16 DS	6 St	32.1	869,6	619,75	4,1	35,84	-8,20
				32.2	869,6	642,91	4,2	31,78	-5,77
				32.3	869,6	655,34	4,3	33,81	-6,44
				średnia	869,6	639,33	4,2	33,81	-6,80
6	6 Al	16 DM	6 St	44.1	888,89	536,31	5,2	49,52	-19,63
				44.2	869,6	635,0	5,3	50,33	-24,49
				44.3	869,6	553,47	5,5	47,0	-16,39
				średnia	876,03	574,92	5,33	49,88	-20,17

Oznaczenia: St – stal kadłubowa kat. A, Al – stop AlZn5Mg2CrZr, DS – drewno sosnowe, DM – drewno modyfikowane, F_{smax} - maksymalna siła ściskająca, F_{rmax} - maksymalna siła rozciągająca

3. ANALIZA I WYNIKI BADAŃ

Podczas próby przestrzeliwania próbek kompozytowych prędkości początkowe pocisku wahały się w granicach 800 – 900 m/s, a maksymalne wartości siły w tulei wynosiły od $F_{smax} = 73$ kN i $F_{rmax} = -33$ kN (stal – drewno modyfikowane – stal) do nawet poniżej $F_{smax} = 15$ kN i $F_{rmax} = -5$ kN (aluminium – drewno naturalne – aluminium). Odporność na przestrzeliwanie warstw aluminium – drewno modyfikowane – aluminium jest porównywalne do przestrzeliwania warstw aluminium – piasek – aluminium oraz aluminium – szkło – aluminium. Zasadnicza energia jest pochłaniana przez elementy metaliczne próbki. Niemniej najmniejszą odporność na przestrzeliwanie wykazały próbki w których warstwa środkowa była z drewna naturalnego. Wyniki badań wykazały, że chociaż drewno (niezależnie naturalne/modyfikowane) nie stawia dużego oporu pociskowi, to odporność na przestrzeliwanie drewna modyfikowanego jest ok. 1,5 raza większa w stosunku do drewna naturalnego.

W tabeli 5 (kolumna 6) zanotowano maksymalny kąt ϕ wychylenia wahadła na skutek oddziaływania pocisku na próbkę. Kąt wychylenia wahadła jest tym większy (a tym samym i energia zaabsorbowana przez próbkę), im większy jest impuls siły uderzenia pocisku. Z tabeli 5 wynika (wiersz 2), że największy opór pociskowi stawiały próbki, których warstwy zewnętrzne były stalowe a warstwą wewnętrzną było drewno modyfikowane. Niewielki opór pociskowi stawiały próbki w których warstwa wewnętrzna była z drewna naturalnego.



Rys. 2. Obraz próbek z warstwą pośrednią z drewna po przestrzeleniu pociskami kal. 7,62 mm: a) drewna modyfikowanego, b) drewna naturalnego

Na rys. 2 przedstawiono obraz zniszczonej pośredniej warstwy a) drewna modyfikowanego i b) drewna naturalnego. Można zaobserwować, że w przypadku niszczenia pośredniej warstwy drewna modyfikowanego (rys. 2a) dominuje fragmentacja. Próbka pośrednia stawiająca duży opór została zniszczona, można zaobserwować fragmenty materiału podczas gdy próbka pośrednia z drewna naturalnego (rys. 2b) doznała perforacji. Pocisk natrafił na niewielki opór ze strony warstwy pośredniej.

PODSUMOWANIE

1. Próbki stalowe lub aluminiowe z warstwą drewna modyfikowanego w porównaniu z analogicznymi próbkami z drewna naturalnego stawiają pociskowi większy opór (maksymalna siła ściskająca w tulei jest znacznie większa), ale na skutek dłuższego kontaktu z pociskiem absorbują nieco większą porcję jego energii (impuls uderzenia pocisku i kąty wychylenia wahadła balistycznego są większe).
2. Warstwa drewna modyfikowanego jest bardziej efektywna niż warstwa drewna naturalnego. Uzyskuje się zwiększenie absorpcji energii pocisku i wzrost maksymalnej siły w tulei.
3. Proces niszczenia pośredniej warstwy o średnicy 50mm drewna modyfikowanego pociskiem 7,62mm ma charakter fragmentacji natomiast drewna naturalnego dominuje perforacji.

BIBLIOGRAFIA

1. Almohandes A.A., Abdel-Kader M.S., Eleiche A.M.: *Experimental investigation of the ballistic resistance of steel-fiberglass reinforced polyester laminated plates*, Composites Part B Eng 27, 1996, pp. 447-458.
2. Dobrociński S. + inni *Badania odporności udarowej dwuwarstwowych próbek ze stopu AlZn5Mg2CrZr*, Zesz. Nauk. AMW (2), 2000, pp.138-146.
3. Kyzioł L. *Badania odporności balistycznej kompozytów z zastosowaniem drewna modyfikowanego*, Zeszyty Nauk AMW, Nr 3, 2004, str. 69-80.
4. Kyzioł L. *Reinforcing wood by surface modification*, Composite Structures, 158, 2016, pp. 64-71.

5. Kyzioł L., Szwabowicz M., *Toughness of Scots pine – polymethyl methacrylate composite*, Polymer Composites, 2018 DOI: 10.1002/pc.24740.
6. Kyzioł L., *Drewno modyfikowane na konstrukcje morskie*, AMW, 2010, Gdynia.
7. Kyzioł L. *Examination results of methylmethacrylate concentration in modified woods*, Polish Academy of Sciences-Branch in Gdańsk. Marine Technology Transactions. 11 2000, pp.181-193.
8. Kyzioł L., Kowalski S.J. *Mechanical properties of modified wood*, IUTAM Symposium on Theoretical and Numerical Methods in Continuum Mechanics of Porous Materials. University of Stuttgart. Germany, September 5-10 1999, pp. 221-228.
9. Kyzioł L. *Distribution of methylmethacrylate concentration in a porous material*, Polish Academy of Sciences-Branch in Gdańsk. Marine Technology Transactions 10, 1999, pp. 175-190.
10. Pogodin-Aleksiejew D. *Wytrzymałość dynamiczna i kruchość metali*, WNT, 1969, Warszawa.
11. Zukas J.A. et al. *High Velocity Impact Dynamics*, John Wiley&Sons Inc U.K., 1990.
12. Jamrozik K., Karliński J., Nieliniowa analiza numeryczna uderzenia balistycznego w zagadnieniach dynamiki konstrukcji, Zeszyty Naukowe WSOWLąd, Nr 1 (135) 2005, pp. 24-33.
13. Perzyna P.: *Teoria lepkoplastyczności*. PWN, Warszawa 1966.
14. Wierzbicki T.: *Obliczenia konstrukcji obciążonych dynamicznie*. Arkady, Warszawa 1980.
15. PAM-SHOCK™: *Solver Notes Reference Manual*. Version 2000, PSI, The Software Company of ESI Group, 2000.
16. Follansbee P. S., *Fundamentals of strength*, Wiley, New Jersey, 2014.
17. Follansbee P. S., Huang J. C., and Gray G. T., *Low-temperature and high-strain-rate deformation of nickel and nickel-carbon alloys and analysis of the constitutive behavior according to an internal state variable model*, Acta Metallurgica et Materialia, Vol. 38, No.7, 1990, pp. 1241-1254.
18. Johnson G.R., Cook W.H., *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, The Hague, The Netherlands, April 1983, pp. 541-548.

Resistance to the piercing of composite materials

For structures that carry dynamic loads, the requirements are imposed for safety reasons. The requirements apply to both materials and construction. This requires searching for optimal calculation methods, including geometric and physical nonlinearity, which are results from the construction of the structure. An example is various ballistic structures (ballistic shields), which are hit by bullets in which huge energy is accumulated. In this case, the hitting in the shield with a bullet can be considered as a load due to mass impact. Loads at high strain rates are described by various mathematical models. The mathematical model is complex because a large number of "coefficients" is required, moreover, the obtained test results are not always repeatable. The paper presents the results of shooting multilayer plates with composite materials with 7.62 mm caliber bullets. The shield consisted of three layers, the outer layers were steel or aluminum, the inner layer was natural or modified wood. The samples had the shape of a shield and were 50 mm in diameter and of different thickness. The results of the research allowed to assess the impact of wood modification on its puncture resistance.

Autor:

dr hab. inż. **Lesław Kyzioł** – Akademia Morska w Gdyni, Wydział Mechaniczny, leslawkyziol@gmail.com

JEL: L64 DOI: 10.24136/atest.2018.129

Data zgłoszenia: 2018.05.23 Data akceptacji: 2018.06.15