

Zdzisław Zatorski

ODPORNOŚĆ NA OSTRZAŁ KOMPOZYTÓW CERAMIKA-GUMA-STAL

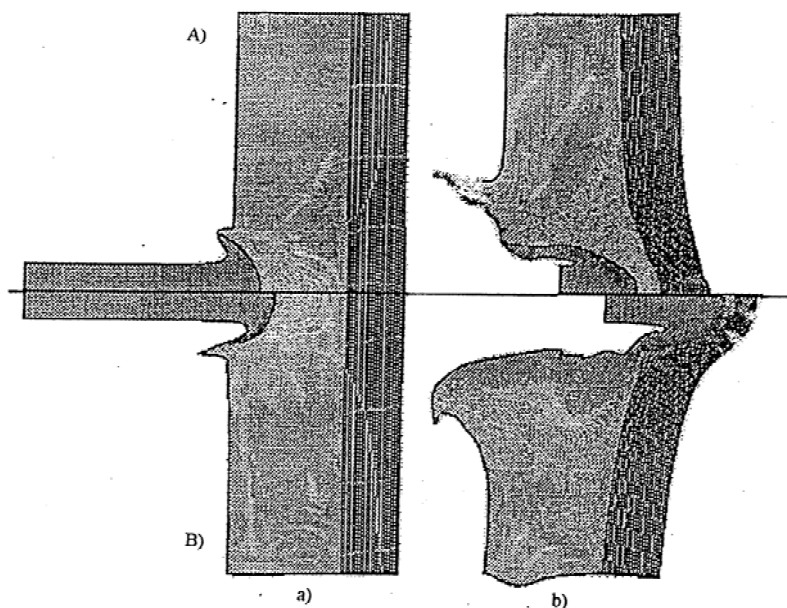
STRESZCZENIE

Przedstawiono wyniki badań odporności na ostrzał kompozytów ceramika-guma-stal. Wykazano, że badane kompozyty mogą spełniać wymagania odporności balistycznej podane w normie DIN 52290 i EUROPEAN STANDARD CEN.

WSTĘP

Proces wnikania pocisku w pancerz uzależniony jest od wielu parametrów. Należą do nich właściwości materiałowe pocisku i tarczy, prędkość i masa pocisku, jego kształt i konstrukcja. Pocisk winien mieć wysoką gęstość i wytrzymałość, a także dużą gęstość energii kinetycznej w przekroju czynnym przebijania. W tarczy istotna jest jej grubość, konstrukcja i sposób podparcia, a wśród właściwości materiałowych jak najwyższy moduł sprężystości poprzecznej, odkształcenia objętościowego oraz gęstość, wytrzymałość i twardość.

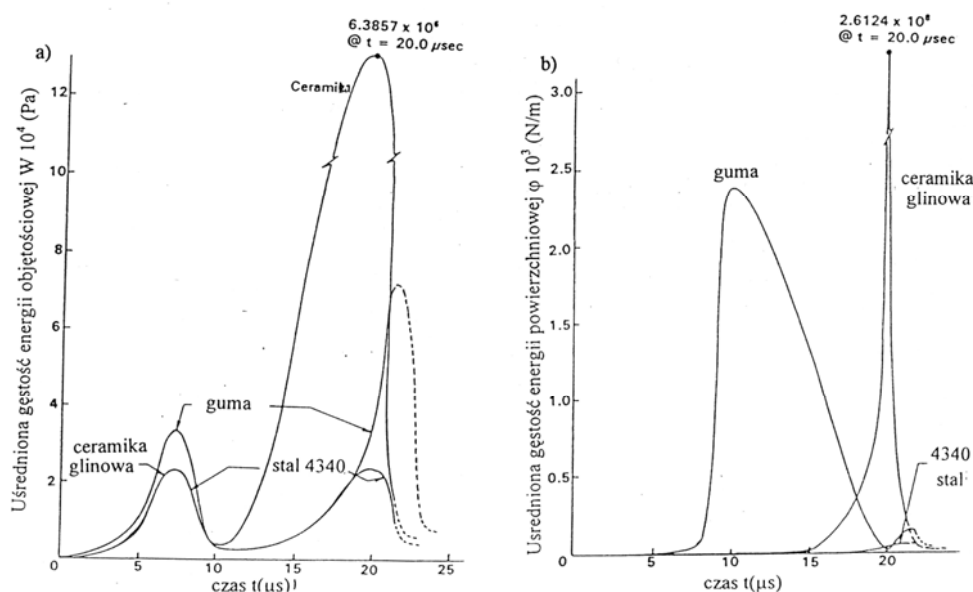
Komputerową symulację procesów przebijania kompozytów ceramika aluminiowa / stal opracował K. Jach (i inni) [3] w oparciu o metodę punktów swobodnych. Przykład modelowania przebijania dwuwarstwowego kompozytu zarówno dla wolnego narastania pęknięć ($k_s=0,05$), jak i szybkiego narastania pęknięć ($k_s=0,5$) pokazano na rysunku 1. Wyniki doświadczalne wskazują na jakościową poprawność modelowania zachowania się kompozytów pod wpływem dynamicznych obciążeń.



Rys. 1. Wyniki symulacji komputerowej penetracji stalowego pocisku w dwuwarstwowy pancierz z ceramiki glinowej i stali przy różnych prędkościach wzrostu pęknięć w ceramice $k_s=0,05$ (A) i $k_s=0,5$ (B) w czasie $10\mu s$ (a) i $60\mu s$ (b) [3]

Kompozyty wielowarstwowe pozwalają na zaprojektowanie rozproszenia energii uderzenia tarczy poprzez odpowiednie ułożenie materiałów o różnych twardościach i ciągliwościach. Analizę procesu ostrzału z prędkością $V_p=1100 \text{ m s}^{-1}$ pocisku wolframowego w trójwarstwowy kompozyt złożony z warstwy ceramiki aluminiowej (Al_2O_3) o grubości 6 mm, gumy 10 mm oraz ze stali pancerniej typu AISI 4340 o grubości 4 mm przeprowadził Sih w oparciu o teorię gęstości izoenergii [7]. Termin izoenergia dotyczy sytuacji, w której ta sama energia jest przenoszona przez ortogonalną powierzchnię elementu kontinuum. Teoria gęstości izoenergii określa korespondencję stanów energii niezależnie od wielkości naprężeń czy odkształceń.

W miejscu uderzenia energia powierzchniowa jest zamieniana na energię objętościową, a gęstość energii powierzchniowej $\varphi_i = (\Delta W / \Delta A)_i$ zamienia się w gęstość energii objętościowej $\omega(\Delta W / \Delta V)$, gdzie ΔW , ΔA i ΔV – odpowiednio przyrost energii, powierzchni i objętości. Przebieg zmian uśrednionej gęstości energii objętościowej i powierzchniowej podczas penetracji pocisku w kompozycie trójwarstwowym pokazano na rysunku 2. [7].



Rys. 2. Przebieg zmian usrednionej gęstości energii objętościowej (a) i powierzchniowej (b) w ceramice, gumie i stali AISI 4340 podczas wnikania pocisku [7]

Zgodnie z wynikami symulacji komputerowej, w początkowej fazie uderzenia przed fragmentacją ceramiki średnia gęstość energii powierzchniowej i objętościowej w gumie były o dwa lub jeden rząd wielkości większe niż w ceramice i stali. Natomiast kontury gęstości izoenergii w miejscu kontaktu pocisku z ceramiką ujawniły ich wzrost o pięć rzędów wielkości w stosunku do wartości z dala od tych miejsc. W przeciwieństwie do rozkładu energii dla ceramiki i stali, gęstość energii objętościowej dominowała w gumie raczej niż gęstość energii powierzchniowej i zlokalizowana była przy powierzchniach granicznych z ceramiką i płytą stalową. Dzięki temu rozpraszaniu energii w gumie w początkowej fazie procesu uderzenia zmniejsza się szansa na perforację kompozytu.

Istotną dla osłon balistycznych jest ich zdolność do zatrzymywania pocisku, mierzona głębokością wejścia pocisku w osłonę lub nieuszkodzeniem tylnej warstwy konstrukcji. Głębokość zatrzymania pocisku wykazuje jednak rozrzut wyników pomiarów wynikający ze zmiany różnych właściwości, w tym gęstości osłony balistycznej w czasie wnikania pocisku, zwłaszcza przy mniejszych grubościach warstwy ceramicznej [6]. Dlatego stan tylnej warstwy konstrukcji jest pewniejszym kryterium odporności balistycznej.

W obszarze uderzenia pocisku ceramika ulega sproszkowaniu, a sproszkowany materiał przemieszcza się promieniowo na boki pod wysokim ciśnieniem. Stąd tarcie wewnętrzne ceramiki jest jednym z ważnych parametrów odporności balistycznej osłony. Symulację numeryczną wnikania pocisku w tarczę wielowarstwową przeprowadzono w pracy [1] w oparciu o opracowany wcześniej model [2] wielopłaszczyznowego zarodkowania i rozwoju mikropęknięć w kształcie krążków w tarczy. Potwierdzono przy tym zależność wnikania pocisku w tarczę od konfiguracji, geometrii i warunków granicznych kompozytu, a w mniejszym stopniu od użytych materiałów ceramicznych (Al_2O_3+SiC). Opracowany program wykorzystał jako parametr erozji balistycznej krytyczne odkształcenie plastyczne materiału ϵ_{kr} . Ze zwiększeniem parametru erozji i stosunku długości do średnicy pocisku L/d zwiększają się równocześnie prędkość wnikania pocisku w tarczę i odporność balistyczna tarczy, przez zmniejszenie prędkości resztkowej pocisku i naprężeń ściskających w strefie granicznej ceramiki.

Badania własne odporności na ostrzał tarcz ceramika-guma-stal podjęto w celu sprawdzenia wpływu grubości ceramiki i warstwy gumy na odporność balistyczną kompozytu oraz dla sprawdzenia odporności balistycznej nowo opracowanej w Akademii Marynarki Wojennej stali bainitycznej gat. 10GHMBA [5]. Badania przeprowadzono na nowo opracowanym i opatentowanym w Akademii Marynarki Wojennej zunifikowanym stanowisku do badania odporności balistycznej materiałów [4].

BADANIA WŁASNE

Badania odporności na ostrzał pociskami kalibru 7,62 mm AP o masie 9,5 g i prędkości początkowej 830 m/s przeprowadzono na tarczach o średnicy 120 mm wyciętych z blachy o grubości 8,6 mm z bainitycznej stali 10GHMBA. Blacha miała właściwości mechaniczne: $R_e=733$ MPa, $R_m=763$ MPa i $A_5=18\%$ oraz twardość 262 HV10. Na tarcze stalowe naklejono jedną lub dwie warstwy gumy o grubości 5,5 mm, a następnie płytki z balistycznej ceramiki aluminiowej ($Al_2O_3 + SiC$). Stosowano cztery rodzaje płytek ceramicznych: płytki gładkie o wymiarach 50x50x5 mm i 50x50x10 mm oraz płytki z reliefem X o wymiarach 159x45x5 mm i 159x45x10 mm. Do naklejenia warstwy gumy i płytek ceramicznych użyto spoiwa Epidian-5 z utwardzaczem Z-1.

Tarcze oznaczono symbolem CGS uzupełnionym liczbami: 5 lub 10 i 5x lub 10x – oznaczającymi grubość zastosowanych płytek ceramicznych (x oznacza płytki z reliefem), g lub 2g – oznaczającymi nałożenie jednej lub dwóch warstw gumy i 8,6 – oznaczającym grubość blachy stalowej w tarczy.

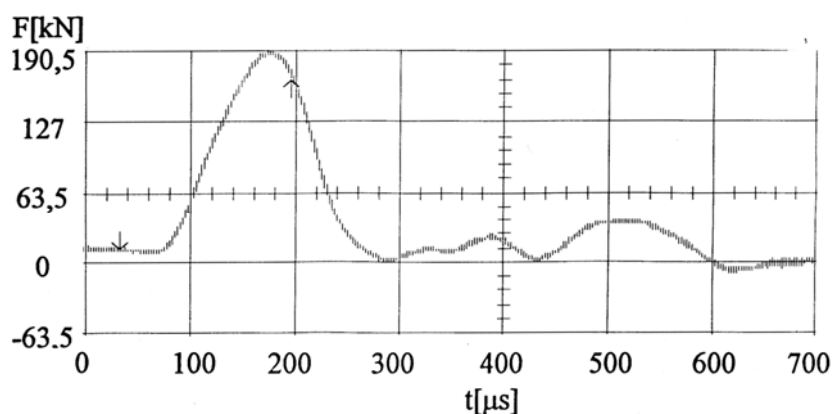
Badaniom poddano tarcze: CGS 5/g/8,6; CGS 5/2g/8,6; CGS 10/g/8,6; CGS 10/2g/8,6; CGS 5x/g/8,6 i CGS 10x/g/8,6.

Tarcze próbne mocowano na tulejowym dynamometrze i ostrzeliwano na stanowisku do oceny odporności na ostrzał ze specjalnego karabinu maszynowego pociskami kalibru 7,62 mm AP o masie 9,5 g i prędkości początkowej 830 m/s. Ostrzał prowadzono z odległości 3 m. W czasie ostrzału rejestrowano na dynamometrze w układzie wahadła balistycznego przebieg zmian siły uderzenia przy wgłębianiu się pocisku w tarczę próbną. Po ostrzale rejestrowano na zdjęciach powstałe uszkodzenia tarcz próbnych.

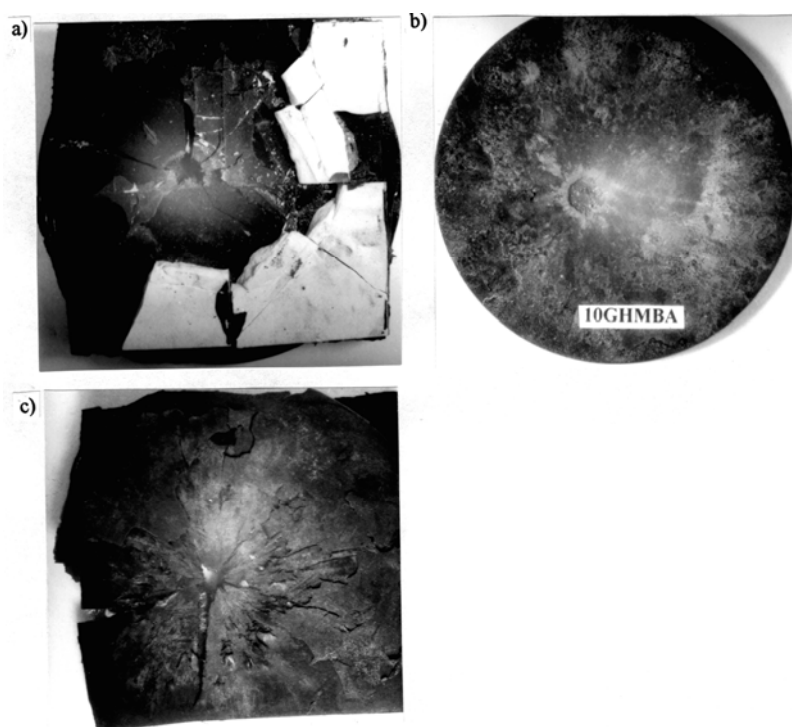
Skutki ostrzału kompozytowych tarcz próbnych były następujące:

Tarcza CGS 5/g/8,6:

Przebieg siły uderzenia pociskiem pokazano na rysunku 3. Największa siła uderzenia $F_{\max}=176,7$ kN. Płytkę ceramiczną rozbita. W warstwie gumy erozja balistyczna. Na blasze tarczy, w osi uderzenia pocisku, miejscowe płytkie wgłębienie bez śladów ścinania adiabatycznego potencjalnych czopów (rys. 4.).



Rys. 3. Przebieg siły uderzenia pociskiem kal. 7,62 mm AP z prędkością 830 ms^{-1} w kompozytową tarczę CGS 5/g/8,6 (ceramika glinowa+guma+stal gat. 10GHMBA)



Rys. 4. Skutki uderzenia pocisku kal. 7,62 mm AP z prędkością 830 ms^{-1} w kompozytową tarczę CGS 5/g/8,6: a) i b) widoki od strony wlotu pocisku; c) erozja balistyczna na tylnej stronie warstwy gumy

Tarcza CGS 5/2g/8,6:

Największa siła uderzenia $F_{\text{max}}=203,0 \text{ kN}$. Rozbita płytka ceramiczna. Erozja balistyczna obu warstw gumy. Niewielkie wgłębienie w blasze w osi wlotu pocisku bez śladów ścinania adiabatycznego.

Tarcza CGS 10/g/8,6:

Największa siła uderzenia $F_{\text{max}}=152,9 \text{ kN}$. Rozbita płytka ceramiczna. Erozja balistyczna warstwy gumy. Na blasze ślady uderzeń fragmentów pocisku i ceramiki bez ugięcia blachy.

Tarcza CGS 10/2g/8,6:

Największa siła uderzenia $F_{\text{max}}=192,5 \text{ kN}$. Rozbita płytka ceramiczna. Erozja balistyczna obu warstw gumy. Na blasze nieliczne ślady uderzeń fragmentów pocisku bez ugięcia blachy.

Tarcza CGS 5x/g/8,6:

Największa siła uderzenia $F_{\max}=171,4$ kN. Rozbita płytka ceramiczna. Erozja balistyczna warstwy gumy. Na blasze miejscowe płytkie wgłębienie w osi wlotu pocisku bez śladów ścinania adiabatycznego.

Tarcza CGS 10x/g/8,6:

Największa siła uderzenia $F_{\max}=162,4$ kN. Rozbita płytka ceramiczna. Erozja balistyczna warstwy gumy. Na blasze ślady fragmentów pocisku bez ugięcia blachy.

DYSKUSJA NAD WYNIKAMI BADAŃ

Gęstość energii rozproszonej przez blachę stalową o grubości 8,6 mm jest niewielka wobec gęstości energii rozpraszanej kolejno przez warstwę ceramiki o grubości 5 lub 10 mm i warstwę gumy o grubości 5,5 lub 11 mm.

Wskutek osłony płytkami ceramicznymi o grubości 5 mm i warstwą gumy o grubości 5,5 mm wszystkie tarcze próbne wykazały odporność na ostrzał pociskami kalibru 7,62 mm AP o masie 9,5 g z prędkością początkową 830 m/s z odległości 3 m, jednak przy niezbyt głębokim miejscowym wgnieceniu blachy stalowej i bez śladów ścinania adiabatycznego.

Istotne zwiększenie siły uderzenia pocisku związane było z małą grubością warstwy ceramiki 5 mm i zwiększeniem grubości warstwy gumy do 11 mm. Nie stwierdzono pozytywnego wpływu zwiększenia grubości warstwy gumy z 5,5 mm do 11 mm na odporność na ostrzał kompozytu.

W przeprowadzonych próbach z ceramiką aluminową grubości 10 mm na powierzchniach stali obserwowano jedynie ślady po fragmentach pocisku i ceramiki bez ugięcia płyty. Gęstość energii rozpraszana przez płytę stalową jest nieznaczna wobec przenoszonej kolejno przez gumę i ceramikę.

Podobne zachowania obserwowano na wszystkich przebadanych kompozytach. Wystarczającą kuloodporność płyt ze stali gat. 10GHMBA zapewniają osłony z ceramiki aluminowej grubości 5 mm i gumy grubości 5,5 mm. Z drugiej strony zastosowanie ceramiki grubości 10 mm pozwala znacznie zmniejszyć grubość blach podłoża stalowego do około 4 – 5 mm, typowych dla konstrukcji nadbudówek na jednostkach pływających. Generalnie można wskazać na możliwość spełnienia wymagań odporności balistycznej według CEN i DIN przez prezentowane kompozyty CGS oraz ich wykorzystanie do osłony nadbudówek.

Ogólnie biorąc, wyniki badań odporności na ostrzał blachy o grubości 8,6 mm ze stali gat. 10GHMBA pozwalają uznać, że przy zastosowanych osłonach balistycznych wykażą one wystarczającą odporność na ostrzał także przy grubości 5 mm w górę.

WNIOSKI

Wyniki badań pozwalają stwierdzić, że:

1. Zwiększanie grubości warstwy gumy w osłonie balistycznej powyżej 5,5 mm nie jest celowe, ponieważ nie zwiększa odporności osłony na ostrzał.
2. Blachy o grubości od 5 mm wzwyż ze stali 10GHMBA przy osłonie warstwą ceramiki o grubości 10 mm i warstwą gumy o grubości 5,5 mm mogą wykazać dobrą odporność na ostrzał pociskami kal. 7,62mm AP.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Espinoza H. D. et al., *A numerical investigation of penetration in multilayered material/structure systems*, „Int. J. Solids Structures”, 1998, No 22, Vol. 35.
- [2] Espinoza H. D., *On the dynamic shear resistance of ceramic composites and its dependance on applied multiaxial deformation*, „Int. J. Solids Structures”, 1995, No 11, Vol. 32.
- [3] Jach K. i in., *Komputerowe modelowanie dynamicznych odkształceń ciał metodą punktów swobodnych*, PWN, Warszawa 2001.
- [4] Patent UP RP nr 0641, AMW, 1999, *Zunifikowane stanowisko do badania odporności balistycznej materiałów, zwłaszcza okrętowych konstrukcyjno-osłonowych i pancernych*, twórcy wynalazku: J. Fila, Z. Zatorski.
- [5] Patent UP RP nr 166545, 7.08.1990, *Stal bainityczna, zwłaszcza na konstrukcje okrętowe i hydrotechniczne morskie*, twórcy wynalazku: J. Fila, Z. Zaczek, Z. Zatorski.
- [6] Rupert N. I., Grace F. I., *Penetration of long rods into semi-infinite bi-element targets*, Proc. 14th Symp. on Ballistics, Quebec, 26 – 29 September 1993.

- [7] Sih G. C., *Impact damage of laminated composite with energy dissipation*, Part I: *Nonhomogenous characteristics*, Part II: *Damage evolution*, „Theoretical and Applied Fracture Mechanics”, 1995, Vol. 22.

ABSTRACT

The paper presents the results of investigations into resistance to fire of ceramic-rubber-steel composite laminates. It shows that investigated composite laminates can meet the requirements of ballistic resistance given in norm DIN 52290 and EUROPEAN STANDARD CEN.

Recenzent prof. dr hab. inż. Zbigniew Zaczek