

Zastosowanie cieczy i żeli nienewtonowskich w osłonach balistycznych

Application of shear thickening fluids for ballistic shields

Radosław Tatko

Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Budownictwa, Plac Grunwaldzki 24a, 50-375 Wrocław, PL

Jerzy Hoppe

Systemy Zabezpieczeń Bankowych „JAKUSZ”, ul. Przemysłowa 40, 83-400 Kościerzyna, PL

Streszczenie: *W artykule przedstawiono aktualny stan wiedzy dotyczący zastosowania cieczy nienewtonowskich w osłonach balistycznych. Szczególne znaczenie dla zastosowań balistycznych mają ciecze zagęszczane ścinaniem, dla których wraz ze wzrostem szybkości ścinania następuje nieproporcjonalnie szybszy przyrost naprężeń stycznych w cieczy. Obecne badania skupiają się na dwóch sposobach wykorzystania tych cieczy: impregnowanie miękkich osłon balistycznych wykonywanych z tkanin z włókien aramidowych czy polietylenowych oraz impregnowanie lekkich, sprężystych pianek siatkowych, o otwartych porach, wykorzystywanych jako wewnętrzna warstwa osłon balistycznych. Wyniki przeprowadzonych badań świadczą o korzystnym wpływie cieczy nienewtonowskich na właściwości balistyczne osłon.*

Słowa kluczowe: ciecz nienewtonowska, ciecz zagęszczana ścinaniem, osłona balistyczna, pancierz.

Keywords: non-Newtonian fluid, shear thickening fluid, ballistic shields, armour.

1. Wstęp – lekkie osłony balistyczne

Obecnie osłony balistyczne przeznaczone do ochrony ludzi jak i sprzętu wykonywane są na ogół z włókien aramidowych (np. kevlar) i włókien polietylenowych (np. dyneema) przede wszystkim w postaci specjalnych, gęsto tkanych tkanin. Wykorzystuje się tu specjalne, wytrzymałsze odmiany materiału wyjściowego, np.: kevlar 49, kevlar HT, twaron CT, dyneema SK 66. W przypadku dyneemy stosowane są także specjalne, nietkane materiały jak dyneema fraglight czy jednokierunkowe maty do prasowania UD 66. Materiały te w postaci wielowarstwowych, zszywanych pakietów tworzą tzw. miękkie osłony balistyczne (kamizelki kuloodporne, maty przeciwołamkowe - rys. 1, 2).



Rys. 1. Przestrzenna elastyczna osłona balistyczna. [1]

Na bazie wyżej wymienionych włókien wykonuje się również sztywne osłony balistyczne (helmy ochronne, tarcze, pancerze) w postaci sprasowanych kompozytów z matrycą polimerową. Z tych samych materiałów wykonuje się osłony balistyczne stanowiące zabezpieczenie wnętrz pojazdów (rys. 3).



Rys. 2. Wielofunkcyjna osłona balistyczna TK/Pm 06. [2]

Osłony wykorzystywane w zabezpieczaniu personelu i sprzętu przed skutkami wybuchów, uderzeniami pocisków i odłamków wykonywane są również w postaci paneli warstwowych, zbudowanych z materiałów o dużej wytrzymałości na działanie obciążeń dynamicznych, wysokiej zdolności do pochłaniania energii uderzenia czy wybuchu oraz dużej ciągliwości. Szczegóły techniczne dotyczące budowy i rodzaju użytych materiałów pozostają tajemnicą producenta i nie są bliżej przedstawiane w literaturze. Przykładem zastosowania tego typu produktu jest Modułowy System Osłon Balistycznych (Modular Ballistic Protection System - MBPS) (rys. 4), zbudowany z paneli, w których zewnętrzne warstwy wykonano z kompozytów aramidowych, a rdzeń stanowi warstwa balsy. Panele warstwowe o nieznanym bliżej konstrukcji wykonywane są jako osłony zabezpieczające przed skutkami wybuchu min przeciwpiechotnych (fala detonacyjna i uderzenie odłamkiem) (rys. 5).

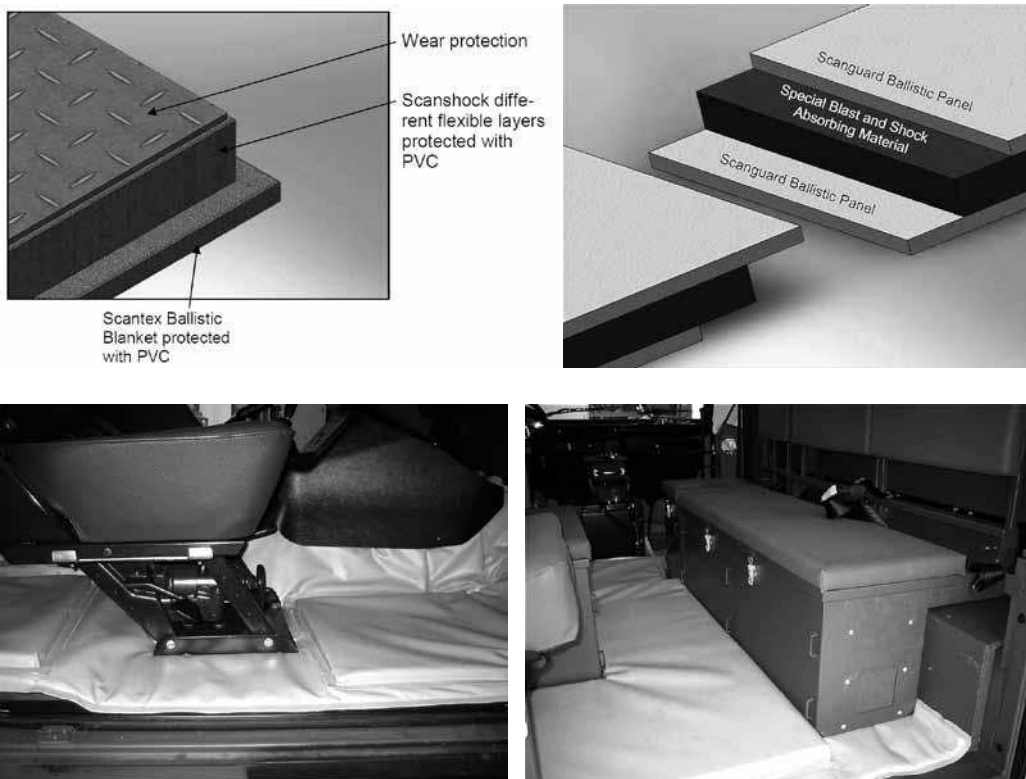


Rys. 3. Scantex - osłona boczna pojazdu i koc balistyczny. [3]



Rys. 4. Modułowy system osłon balistycznych. [4]

Oslony balistyczne są przedmiotem badań doświadczalnych i analiz teoretycznych (analitycznych i numerycznych) prowadzonych pod kątem ulepszenia ich właściwości ochronnych. Dotyczą one głównie osłon wykonywanych jako: wielowarstwowe kompozyty lub laminaty i tkaniny z włókien polimerowych [6÷11], osłony warstwowe z różnych stopów aluminium [12] czy różnych gatunków stali [13,14], a także osłony mieszane zbudowane np. z warstw ze stali pancernej i laminatu z włókien polimerowych [15].



Rys. 5. Osłony typu Scanshock i Scanguard. [5]

2. Osłony balistyczne impregnowane cieczami nienewtonowskimi

Jednym z aktualnie najszerzej badanych sposobów na zwiększenie odporności miękkich osłon balistycznych jest ich impregnacja cieczami nienewtonowskimi (shear thickening fluids - STF). Są to płyny, których lepkość zmienia się wraz z szybkością ścinania, w wyniku czego, stosunek naprężenia ścinającego, do szybkości ścinania nie jest wielkością stałą. Wśród cieczy nienewtonowskich szczególne znaczenie dla zastosowań balistycznych mają ciecze zagęszczane ścinaniem, dla których wraz ze wzrostem szybkości ścinania następują nieproporcjonalnie szybszy przyrost naprężeń stycznych w cieczy.

W pracach [16,17] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych tego typu kompozytów składających się z tkanin wysokowytrzymałych z kewlaru (Kewlar KM-2 Style 706) impregnowanych roztworem koloidalnym, w którym substancją dyspersyjną był glikol etylenowy, a substancją zdyspergowaną krzem (Nissan Chemicals MP4540), o średniej średnicy cząstek ok. 440 nm. Do badań użyto standardowego symulatora odłamka (FSP) o masie 1,1 g i średnicy 5,6 mm, uderzającego w cel z prędkością 244 m s⁻¹. Wykazano, że impregnacja nienewtonowskim roztworem koloidalnym znacząco poprawia parametry balistyczne osłony, zarówno w porównaniu z tkaniami nieimpregnowanymi, jak i impregnowanymi cieczami newtonowskimi. Wykazano ponadto, że absorpcja energii osłony impregnowanej cieczą nienewtonowską jest wprost proporcjonalna do ilości cieczy.

W pracach [18÷21] przedstawiono wyniki badań osłon na przekłucie i przecięcie. Badano tkaniny kewlarowe (KM-2 Style 706) i nylonowe o różnych gęstościach liniowych włókien, impregnowane tym samym, co w ww. pracach, nienewtonowskim roztworem koloidalnym. Zastosowana ciecz nienewtonowska charakteryzowała się zmienną lepkością wynoszącą ok. $20 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ przy prędkości ścinania 5 s^{-1} do $410 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ przy prędkości ścinania 12 s^{-1} . Wykazano, że osłona składająca się z dwunastu warstw impregnowanego kewlaru zapewnia lepszą ochronę przed uderzeniem nożem w porównaniu ze sztywniejszą, piętnastowarstwową osłoną z nieimpregnowanego kewlaru. Badania wykazały ponadto, że liczba i gęstość liniowa włókien nylonowych ma bardzo niewielki wpływ na odporność tkaniny na cięcie, w przeciwieństwie do odporności na przekłucie, która jest odwrotnie proporcjonalna do gęstości liniowej włókien. Wykazano również, że impregnowanie tkanin nylonowych cieczami nienewtonowskimi wpływa korzystnie na ich odporność balistyczną.

W pracy [22] przedstawiono badania lekkich osłon kewlarowych (na bazie tkaniny KM-2 Style 706) impregnowanych mieszaniną glicerolu i cząstek gliny kaolinitowej, o wymiarze ok. 500 nm . Badano odporność osłon na uderzenie standardowego symulatora odłamka, a także na przekłucie i przecięcie. Celem badań było wykazanie wpływu kształtu cząstek substancji zdyspergowanej na właściwości balistyczne tkanin impregnowanych. Porównywano wyniki badań tkanin nieimpregnowanych i impregnowanych oboma rodzajami mieszanin (z cząstkami gliny kaolinitowej, o kształtach spłaszczonych i cząstkami krzemowymi, stosowanymi w [16÷21], o kształtach kulistych). Stwierdzono występowanie różnic w przyroście lepkości obu cieczy podczas przyrostu szybkości ścinania. Dla mieszaniny z cząstkami gliny przyrost ten jest ciągły, a dla mieszaniny z cząstkami krzemu - nieciągły. Zaobserwowano, że mieszanina z cząstkami gliny lepiej wnika w tkaniny, a cząstki te otaczają równomiernie wszystkie włókna tkaniny, tworząc warstwę ochronną dla włókien kewlarowych. Wykazano, że osłona impregnowana mieszaniną z cząstkami gliny ma nieznacznie większą odporność na przekłucie w porównaniu do osłon z impregnatem z cząstkami krzemowymi. Testy balistyczne z użyciem symulatora odłamka wykazały, że tkaniny impregnowane mieszaniną z cząstkami gliny mają większą odporność w porównaniu z tkaninami nieimpregnowanymi, lecz odporność ta jest mniejsza w porównaniu z kompozytami impregnowanymi mieszaniną z cząstkami krzemowymi.

W artykule [23] przedstawiono wyniki badań odporności na przekłucie i przecięcie i uderzenie odłamkiem lekkich osłon kewlarowych (na bazie tkaniny KM-2 Style 706) impregnowanych kolejną nienewtonowską mieszaniną składającą się z cząstek polimerowych poli(metakrylanu metylu) – PMMA i ośrodka rozpraszającego – glikolu polietylenowego. Wykazano, że użycie tego impregnatu poprawiło skuteczność osłony na przekłucie w warunkach quasi-statycznych, w porównaniu z osłoną nieimpregnowaną. Znacznie mniejszą poprawę skuteczności osłony uzyskano w badania balistycznych przy małych prędkościach uderzenia. Stwierdzono, że sferyczne cząstki polimeru podczas uderzenia ulegają znacznym deformacjom. Badania te wykazały, że twardości cząstek rozproszonych w koloidzie wpływa znacząco na właściwości osłon narażonych na większe energie uderzenia.

3. Inne zastosowania cieczy nienewtonowskich w osłonach balistycznych

Innym sposobem wykorzystania płynów nienewtonowskich w osłonach balistycznych jest zaimpregnowanie cieczą pianek o otwartych porach i zastosowanie ich, jako jednej z warstw osłon. W pracy [24] przedstawiono wyniki badań doświadczalnych dotyczących dynamicznej odpowiedzi ściskanej sprężystej pianki poliuretanowej, o otwartych komórkach, zaimpregnowanej układem koloidalnym złożonym z nanocząstek krzemu (Fuso Chemical Co., Osaka, Japan), o wielkości 290 nm , rozproszonych w glikolu etylenowym (VWR, West Chester, USA). Badano próbki walcowe o wymiarach $D \times h = 25,4 \times 12,6 \text{ mm}$, poddane ściskaniu z prędkością odkształcenia z zakresu $(1 \div 400) \text{ s}^{-1}$. Wykazano, że badana ciecz nienewtonowska poddana ściskaniu z prędkością odkształceń powyżej 1 s^{-1} zachowuje się jak ciecz gwałtownie zagęszczana ścinaniem, natomiast po przekroczeniu prędkości granicznej ciecz zmienia swoje parametry i staje się cieczą rozrzedzaną ścinaniem. Przy prędkościach odkształceń tego rzędu lepkość cieczy jest na tyle duża, że wpływ pianki i wzajemnych oddziaływań między płynem a pianką na odpowiedź układu mogą być pominięte. W artykule przedstawiono również model teoretyczny, służący do wyznaczania zależności między naprężeniami rzeczywistymi a odkształceniami pianki impregnowanej cieczą nienewtonowską poddanej dynamicznemu ściskaniu dwiema równoległymi płytami przy bardzo dużych prędkościach odkształceń. Model można stosować

przypadku, gdy wymiar pianki w kierunku przepływu cieczy (kierunek promieniowy) jest dużo większy od wymiaru w kierunku działania obciążenia (kierunek osiowy). Wyniki uzyskiwane w modelu teoretycznym są zgodne z wynikami badań dla próbek o stosunku promienia do wysokości z zakresu 1 do 4 i dla dużych prędkości odkształceń pianki z zakresu $(1 \div 400) \text{ s}^{-1}$.

Model, przedstawiony w pracy [24], w artykule [25] rozwinięto i zaproponowano do stosowania przy projektowaniu osłon balistycznych elementów infrastruktury narażonych na działanie wybuchów. Osłony te projektowane mogą być jako osłony warstwowe z wierzchnią warstwą pancerza stalowego i rdzeniem z sprężystej pianki siatkowej, o małej gęstości wypełnionej cieczą nienewtonowską. Do analiz właściwości tego typu osłon wykorzystano sprzężone równania zachowania momentu i dynamicznego zachowania się pianki impregnowanej cieczą nienewtonowską. W artykule przeprowadzono analizy szeregu parametrów osłon, takich jak grubości poszczególnych warstw, właściwości cieczy czy współczynnik kształtu warstwy pianki, mających na celu zoptymalizowanie osłony w sposób umożliwiający zmniejszenie wartości szczytowej naprężeń występujących w osłanianej konstrukcji, co uznane zostało za miarę zniszczeń powstających podczas wybuchu. W wyniku przeprowadzonych obliczeń wykazano, że zastosowanie osłony z pianką impregnowaną cieczą nienewtonowską pozwala zmniejszyć o ponad 90% szczytową wartość naprężeń w konstrukcji ochraniającej w porównaniu z osłoną z monolitycznej płyty o tej samej gęstości powierzchniowej.

4. Wnioski

Ciecze nienewtonowskie mogą znacząco poprawić parametry ochronne osłon balistycznych. Pozwalają na zwiększenie odporności na uderzenie pociskiem czy odłamkiem. Zwiększają odporność osłony na przekłucie i przecięcie. Mimo to ich zastosowanie jest ograniczone głównie do miękkich osłon balistycznych wykorzystywanych do produkcji kamizelek kuloodpornych, mat czy kocy przeciwołamkowych, gdzie mogą być użyte w roli impregnatów. Ich zastosowanie pozwala na uzyskanie tej samej odporności balistycznej osłony przy mniejszej liczbie tkanin w osłonie, w porównaniu do osłon nieimpregnowanych, co wpływa na zmniejszenie sztywności osłony. Parametrami decydującymi o parametrach balistycznych osłon impregnowanych tymi cieczami są m.in. ilość substancji rozproszonej w impregnacji czy twardość i kształt nanocząstek substancji rozproszonej.

Prowadzone są również badania nad zastosowaniem cieczy nienewtonowskich w osłonach balistycznych stosowanych do ochrony elementów infrastruktury narażonych na uderzenie falą uderzeniową powstająca podczas wybuchu. Osłona taka zbudowana może być jako sztywna, warstwowa, składająca się z zewnętrznej płyty stalowej i sprężystej pianki siatkowej nasączona cieczą. Taka konstrukcja osłony pozwala zmniejszyć o ponad 90% szczytową wartość naprężeń w konstrukcji ochraniającej w porównaniu z osłoną z monolitycznej płyty o tej samej gęstości powierzchniowej.

Podziękowanie

Publikacja powstała w ramach dofinansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego przeznaczonych do realizacji projektu rozwojowego – O R00 0066 09 „**Podstawy technologii wytwarzania osłon ochronnych z wykorzystaniem modyfikowanego żelu balistycznego**”, realizowanego w terminie: grudzień 2009 – grudzień 2011 r.

Literatura

- [1] *Przestrzenna elastyczna osłona balistyczna*, Instytut Technologii Bezpieczeństwa MORATEX, ulotka informacyjna.
- [2] *Wielofunkcyjna osłona balistyczna TK/Pm 06*, Instytut Technologii Bezpieczeństwa MORATEX, ulotka informacyjna.
- [3] Field Fit Solutions, Scandfiber Composites A/S.
- [4] Quigley C., Horak K., Devine R., Dagher H., Parent L., Landis E., Goslin K., Cassidy E., *The*

- development and evaluation of modular ballistic panels for fabric shelters*, Proc. 25th Army Science Conf., 'Transformational Army Science and Technology - Charting the Future of S&T for the Soldier' 2006.
- [5] Scanshock i Scanblast, ulotki informacyjne, Scanfiber Composites A/S.
- [6] Morye S.S., Hine P.J., Duckett R.A., Carr D.J., Ward I.M., *A comparison of the properties of hot compacted gel-spun polyethylene fibre composites with conventional gel-spun polyethylene fibre composites*, Composites: Part A, 30, 1999, 649–660.
- [7] Sheikh A.H., Bull P.H., Kepler J.A., *Behaviour of multiple composite plates subjected to ballistic impact*, Composites Science and Technology, 69, 2009, 704–710.
- [8] Tan V.B.C., Shim V.P.W., Tay T.E., *Experimental and numerical study of the response of flexible laminates to impact loading*, Int. J. of Solids and Structures, 40, 2003, 6245–6266.
- [9] Morye S.S., Hine P.J., Duckett R.A., Carr D.J., Ward I.M., *Modelling of the energy absorption by polymer composites upon ballistic impact*, Composites Science and Technology, 60, 2000, 2631–2642.
- [10] Hockauf M., Meyer L.W., Pursche F., Diestel O., *Dynamic perforation and force measurement for lightweight materials by reverse ballistic impact*, Composites: Part A, 38, 2007, 849–857.
- [11] Mayo Jr. J.B., Wetzel E. D., Hosur M.V., Jeelani S., *Stab and puncture characterization of thermoplastic-impregnated aramid fabrics*, Int. J. of Impact Engineering, 36, 2009, 1095–1105.
- [12] Demir T., Ubeyli M., Yildırım R.O., *Investigation on the ballistic impact behavior of various alloys against 7.62 mm armor piercing projectile*, Materials and Design, 29, 2008, 2009–2016.
- [13] Zhou D.W., Stronge W.J., *Ballistic limit for oblique impact of thin sandwich panels and spaced plates*, Int. J. of Impact Engineering, 35, 2008, 1339–1354.
- [14] Teng X., Wierzbicki T., Huang M., *Ballistic resistance of double-layered armor plater*, Int. J. Impact Engineering, 35, 2008, 870–884.
- [15] Jena P.K., Ramanjeneyulu K., Kumar K.S., Bhat T.B., *Ballistic studies on layered structures*, Materials and Design, 30, 2009, 1922–1929.
- [16] Lee Y.S., Wetzel E.D., Egres Jr. R.G., Wagner N.J., *Advanced Body Armor Utilizing Shear Thickening Fluids*, 23rd Army Science Conf., Orlando, FL. December 2-5, 2002.
- [17] Lee Y.S., Wetzel E.D., Wagner N.J., *The ballistic impact characteristics of Kevlar woven fabrics impregnated with a colloidal shear thickening fluid*, J. Materials Science, 38, 2003, 2825–2833.
- [18] Egres Jr. R.G., Decker M.J., Halbach C.J., Lee Y.S., Kirkwood J.E., Kirkwood K.M., Wagner N.J., Wetzel E.D., *Stab Resistance Of Shear Thickening Fluid (STF) - Kevlar Composites For Body Armor Applications*, Proc. 24th Army Science Conf., Orlando, FL., Nov. 29 - Dec. 2, 2004.
- [19] Egres Jr. R.G., Lee Y.S., Kirkwood J.E., Kirkwood K.M., Wetzel E.D., Wagner N.J., *"Liquid armor": Protective fabrics utilizing shear thickening fluids*, IFAI 4th Int. Conf. on Safety and Protective Fabrics, Pittsburgh, PA., October 26-27, 2004.
- [20] Decker M.J., Halbach C.J., Nam C.H., Wagner N.J., Wetzel E.D., *Stab resistance of shear thickening fluid (STF) - treated fabrics*, Composites Science and Technology, 67, 2007, 565–578.
- [21] Hassan T.A., Rangari V.K., Jeelani S., *Synthesis, processing and characterization of shear thickening fluid (STF) impregnated fabric composites*, Materials Science and Engineering A, 2010, doi:10.1016/j.msea.2010.01.018.
- [22] Rosen A.B., Laufer C.H.N., Kalman D.P., Wetzel E.D., Wagner N.J., *Multi-Threat Performance of Kaolin-Based Shear Thickening Fluid (STF) - Treated Fabrics*, Proc. SAMPE 2007, Baltimore, MD., 3-7 June 2007.
- [23] Kalman D.P., Schein J.B., Houghton J.M., Laufer C.H.N., Wetzel E.D., Wagner N.J., *Polymer Dispersion Based Shear Thickening Fluid - Fabrics For Protective Applications*, Proc. SAMPE 2007, Baltimore, MD., 3-7 June 2007.
- [24] Dawson M.A., McKinley G.H., Gibson L.J., *The Dynamic Compressive Response of an Open-Cell Foam Impregnated With a Non-Newtonian Fluid*, J. Applied Mechanics, 76, 2009.
- [25] Dawson M.A., *Composite plates with a layer of fluid-filled, reticulated foam for blast protection of infrastructure*, Int. J. Impact Engineering, 36, 2009, 1288–1295.