

mgr inż. Marcin CEGŁA  
mgr inż. Wiesław HABAJ  
dr inż. Paweł PODGÓRZAK  
mgr Włodzimierz SZUFLITA  
Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

## **BADANIA ZMĘCZENIOWE ELASTYCZNYCH WKŁADÓW DO KAMIZELEK KULOODPORNYCH Z WYKORZYSTANIEM MASZYNY WYTRZYMAŁOŚCIOWEJ ZWICK-ROELL Z100**

**Streszczenie:** Ważną cechą wkładów balistycznych do lekkich kamizelek skrytego noszenia jest możliwość dopasowania do ciała użytkownika. Wiąże się to z wielokrotnym odkształcaniem wkładu podczas wkładania i zdejmowania kamizelki. W pracy przedstawiono problemy związane z badaniami zmęczeniowymi elastycznych próbek układów balistycznych na bazie małogabarytowej ceramiki z tlenku glinu i węgla krzemu. Procesowi zmęczenia mechanicznego ulega przede wszystkim warstwa kleju służąca do powierzchniowego połączenia płytek ceramicznych tworzących wkład balistyczny. Przedstawione zostały możliwości badawcze maszyny wytrzymałościowej Zwick-Roell Z100, sposób wykonania próbek układów balistycznych oraz przyjęta procedura badawcza próbek. Wyniki badań zmęczeniowych przedstawione są w formie porównania zdjęć rentgenowskich badanych próbek układów balistycznych przed i po procesie zmęczenia. Zaprezentowano wyniki badań odporności balistycznej próbek układów balistycznych, przed i po procesie zmęczenia, na pociski amunicji 5,7x28 mm SS190.

Słowa kluczowe: badania zmęczeniowe, maszyna wytrzymałościowa, odporność balistyczna

## **FATIGUE TESTS OF ELASTIC BULLETPROOF VEST INSERTS WITH THE USE OF ZWICK-ROELL Z100 TESTING MACHINE**

**Abstract:** An important characteristic of the ballistic inserts for concealed bulletproof vests is the possibility of adjustment to the body of the user. Multiple stress occurs in everyday use. The article presents problems connected with carrying out fatigue tests of elastic inserts for bulletproof vests made of small-size alumina and silicon carbide ceramics. Fatigue stress has influence mainly on the state of the adhesive layer used to connect ceramic tiles constructing the bulletproof insert. Research capabilities of the Zwick-Roell Z100 testing machine, sample preparation and sample testing procedure are presented. Results of fatigue tests are shown in form of comparison of X-ray photographs of tested samples before and after fatigue procedure. The authors also present results of ballistic tests of samples of elastic bullet proof inserts before and after the fatigue tests against the 5,7x28 mm SS190 projectiles.

Keywords: fatigue tests, testing machine, ballistic resistance

### **1. Wstęp**

Stosowane w siłach zbrojnych oraz innych formacjach mundurowych kamizelki kuloodporne ulegają zużyciu wraz z upływem czasu. Stopień zużycia zależy od bardzo wielu

czynników, począwszy od warunków i intensywności eksploatacji, kończąc na indywidualnych cechach psychofizycznych użytkownika związanych z jego budową anatomiczną czy też kulturą techniczną użytkownika [1]. Polska Norma PN-V-8700:2011 określa okres trwałości wkładów balistycznych na nie mniej niż 6 lat od daty produkcji. Zgodnie z normą badanie niezawodności należy przeprowadzać po 4 i 6 latach od daty produkcji, a następnie co dwa lata [2]. Możliwa jest jednak utrata właściwości ochronnych kamizelek będących w okresie gwarancyjnym w wyniku szczególnie trudnych warunków użytkowania [3].

W przeszłości, w Wojskowym Instytucie Technicznym Uzbrojenia, prowadzono badania wpływu zmęczenia mechanicznego na odporność balistyczną tkaninowego wkładu aramidowego, będącego podstawą konstrukcji kamizelek kuloodpornych. Wyniki wykonanych badań dowodzą podatności tkaniny aramidowej na proces starzenia oraz spadku jej odporności balistycznej [1,3]. Obecnie stosowane kamizelki kuloodporne, poza podstawowym wkładem aramidowym lub polietylenowym wyposażone są w płyty twarde służące do ochrony przed pociskami amunicji pośredniej lub karabinowej. Płyty te wykonane są ze stali pancerniej, lub coraz częściej, z układów kompozytowych na bazie ceramiki. Pojawia się zatem konieczność badania wpływu warunków użytkowania na odporność balistyczną ceramicznych wkładów kamizelkowych. Ma to szczególne znaczenie w przypadku wkładów funkcjonalnie elastycznych ze względu na występowanie w nich środków adhezyjnych mogących ulec mechanicznemu zmęczeniu.

Jednym z rozwiązań, funkcjonalnie elastycznego wkładu kamizelkowego, są układy małogabarytowej ceramiki w postaci kulek w osnowie poliuretanowej [4]. W przypadku tych kompozycji zachodzi obawa spadku odporności balistycznej w wyniku użytkowania związana ze zmęczeniowym osłabieniem granicy faz ceramika/osnowa poliuretanowa. Innym przykładem jest układ płytek ceramicznych, sklejonych ze sobą elastycznym klejem. W tym przypadku istnieje możliwość pęknięcia warstwy adhezyjnej pod wpływem długotrwałego lub niewłaściwego użytkowania. Wymienione przykłady stanowią podstawę do przeprowadzenia badań zmęczeniowych elastycznych układów materiałowych zawierających ceramikę. Jako narzędzie do wykonania badań wykorzystano maszynę wytrzymałościową Zwick-Roell Z-100, która daje możliwość zaprogramowania cyklicznych i powtarzalnych obciążeń.

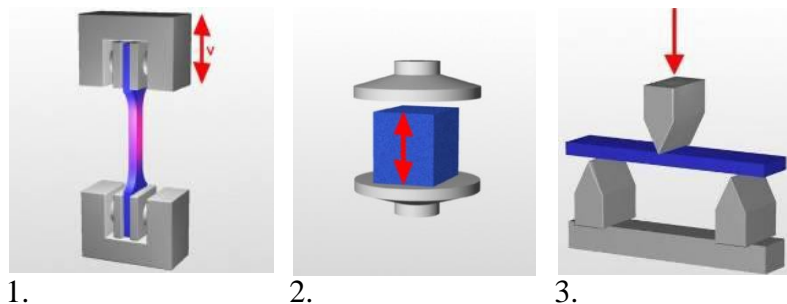
## **2. Procedura eksperymentalna**

### **2.1. Opis stanowiska badawczego**

W pracy wykorzystano maszynę wytrzymałościową Zwick-Roell Z100. Jest to nowoczesne urządzenie badawcze sterowane za pomocą specjalistycznego oprogramowania komputerowego TestExpert. Maszyna posiada trzy podstawowe tryby pracy: ściskanie, rozciąganie i zginanie oraz wiele odpowiednich szczęk i uchwytów do mocowania próbek. Dodatkowo, na wyposażeniu znajdują się specjalne uchwyty do badania wytrzymałości nici na zrywanie. Maszyna posiada dwie głowice pomiarowe o zakresach pracy do 10 oraz 100kN. Poza wymienionymi wyżej klasycznymi badaniami wytrzymałościowymi, można realizować badania zmęczeniowe poprzez wykorzystanie programu badawczego - "Badania cykliczne". Jest on dostępny dla wszystkich trzech trybów pracy maszyny. Stanowisko badawcze pokazane jest na fot. 1.



Maszyna wytrzymałościowa  
Zwick-Roell Z100



Tryby pracy:  
1- rozciąganie, 2 - ściskanie, 3 - 3-punktowe zginanie.

**Fot. 1. Stanowisko badawcze, tryby pracy maszyny wytrzymałościowej**

W badaniach zmęczeniowych próbek układów balistycznych wykorzystano program do badań cyklicznych w trybie pracy 3-punktowego zginania. Oprogramowanie TestExpert pozwala na dobór dużej liczby parametrów badania, takich jak: siła, przemieszczenie, ugięcie próbki oraz prędkość badania. Program pozwala również określić liczbę cykli, które wykona maszyna oraz te, które zostaną zapamiętane i zapisane na wykresie. Ma to znaczenie w przypadku badań, w których występuje duża liczba powtarzających się cykli, takich jak testy zmęczeniowe.

## 2.2. Zastosowane materiały i ich właściwości

Do przygotowania próbek zastosowano materiały ceramiczne w postaci kulek wykonanych z tlenku glinu ( $Al_2O_3$ ) o średnicy 6 mm oraz sześciokątnych płytek ceramicznych wykonanych z tlenku glinu ( $Al_2O_3$ ) i węgla krzemowego ( $SiC$ ). Użyto także balistycznych materiałów tkaninowych: polietylenu Dyneema® SB21 i tkaniny Twaron® CT714. W próbkach zawierających kulki, jako osnowy kompozytu, użyto trzech rodzajów dwuskładnikowych elastomerów poliuretanowych. W próbkach zawierających płytki ceramiczne, w celu ich przyklejenia do powierzchni tkaniny aramidowej, zastosowano dwuskładnikowy klej Terostat 9399. W tabeli 1 przedstawiono właściwości mechaniczne zastosowanych elastomerów polimerowych oraz kleju Terostat 9399.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne utwardzonych elastomerów i kleju Terostat 9399

Parametr	Jednostka	GM 973	GM 951-1	GM 900-1	Terostat 9399
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	$16 \pm 2$	$2 \pm 0,2$	$1,1 \pm 0,2$	~3
Wydłużenie	%	$550 \pm 50$	$980 \pm 100$	$750 \pm 75$	-
Twardość Shore A	-	$90 \pm 3$	$45 \pm 3$	$13 \pm 2$	~60
Odporność na rozerwanie	kN/m	$55 \pm 5$	$5,5 \pm 0,5$	$2,2 \pm 0,2$	-

## 2.3. Przygotowanie próbek

Próbki kompozytowe, będące układem kulek ceramicznych w osnowie żywicy poliuretanowej, zostały wykonane za pomocą form silikonowych. Kulki umieszczano w formie i zalewano przygotowaną dwuskładnikową kompozycją żywicy poliuretanowej.

Wykonano próbki o wymiarach 50x50 mm z jedną warstwą kulek ceramicznych o średnicy 6 mm, oraz dwoma warstwami kulek o średnicy 12 mm. Wykonano również próbki o wymiarach 100x50 mm z jedną warstwą kulek ceramicznych o średnicy 6 mm.

Próbki zawierające heksagonalne płytki ceramiczne wykonano poprzez ułożenie ich w układach po 13 sztuk i pokryciu ich z obu stron warstwą kleju Terostat 9399 o grubości 0,5 mm. Podczas sieciowania powierzchnia kleju była zabezpieczona warstwą tkaniny aramidowej.

### 2.3. Badanie odporności balistycznej i stosowana amunicja

Testy odporności balistycznej przeprowadzone zostały dla jedno- i dwu-warstwowych układów kulek ceramicznych w osnowie żywicy poliuretanowej. Celem badań było porównanie wyników odporności balistycznej układów po zmęczeniu mechanicznym z otrzymanymi podczas wcześniejszych badań wynikami dla próbek niepoddanych zmęczeniu. Do badań stosowano amunicję pistoletową 5,7x28 mm SS190. Testy prowadzone były w tunelu balistycznym przy użyciu lufy prędkościowej SN 2628 kalibru 5,7 mm. Układy ceramika-osnowa poliuretanowa umieszczone były na podłożu z kompozytu polietylenowego Dyneema® w liczbie 42 i 21 warstw odpowiednio dla jedno- i dwu-warstwowego układu kulek ceramicznych. W tabeli 2 przedstawiono właściwości stosowanej amunicji.

Tabela 2. Charakterystyka amunicji 5,7x28 mm SS190 stosowanej do badań

Materiał rdzenia	Prędkość początkowa [m/s]	Masa poc. [g]	E [kJ]	$E_p^*$ [kJ/cm <sup>2</sup> ]
Stal + aluminium	700	2	0,49	1,92

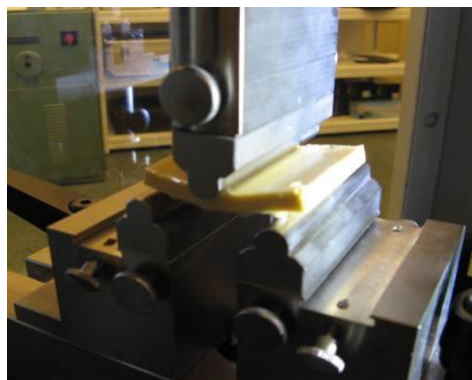
$E_p^*$  - kinetyczna energia jednostkowa w przeliczeniu na pole przekroju poprzecznego pocisku.

### 2.4. Program badań

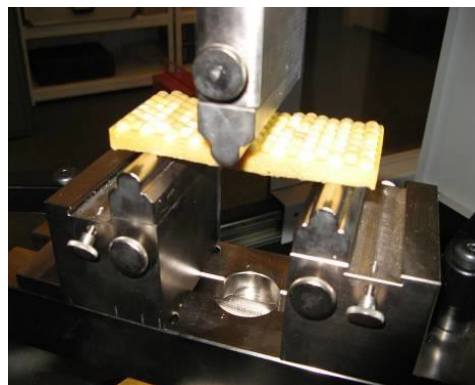
Wykonanie pracy, wymagało opracowania programu badań elastycznych wkładów kamizelkowych, uwzględniającego testy odporności balistycznej, oraz poprzedzających je badań zmęczeniowych. Badania te powinny, jak najwierniej, odzwierciedlać rzeczywiste użytkowanie kamizelki kuloodpornej na przestrzeni lat, a w wyniku dać odpowiedź, jak długotrwałe użytkowanie kamizelki wpłynie na jej odporność balistyczną.

Do wykonania badań zmęczeniowych wykorzystano opisaną wcześniej maszynę wytrzymałościową Zwick-Roell oraz tryb pracy 3-punktowego zginania cyklicznego. W badaniu tym próbka podparta była w dwóch miejscach i przyciskana od góry symetrycznie w połowie długości. W wyniku przyłożonego obciążenia na dolną płaszczyznę próbki działają naprężenia rozciągające, na górną zaś ściskające. Badanie próbek pokazano na fotografii 2.

W programie badań przyjęto intensywną eksploatację kamizelki przez 10 lat. Liczba cykli ugięcia dla każdej próbki wyniosła 3650 w dwóch seriach po 1825. W przybliżeniu odzwierciedlało to codzienne stosowanie kamizelki, jej założenie - wymuszające ugięcie elastycznego wkładu i zdjęcie - powodujące powrót wkładu do kształtu początkowego. Próbki poddano dwukrotnemu badaniu RTG - przed i po badaniach zmęczeniowych. Każda próbka była także poddana oględzinom pomiędzy seriami ugięć. Dobór wartości strzałki ugięcia oraz częstotliwości przyłożenia siły zginającej zależy od konstrukcji próbki i właściwości osnowy poliuretanowej. Średni czas wykonania wszystkich 3650 cykli dla poszczególnych próbek wyniósł ok. dwóch godzin. Pomiar parametrów badania miał w przypadku przeprowadzonych prób znaczenie drugorzędne. Najistotniejsze było zastosowanie maszyny Zwick-Roell, jako



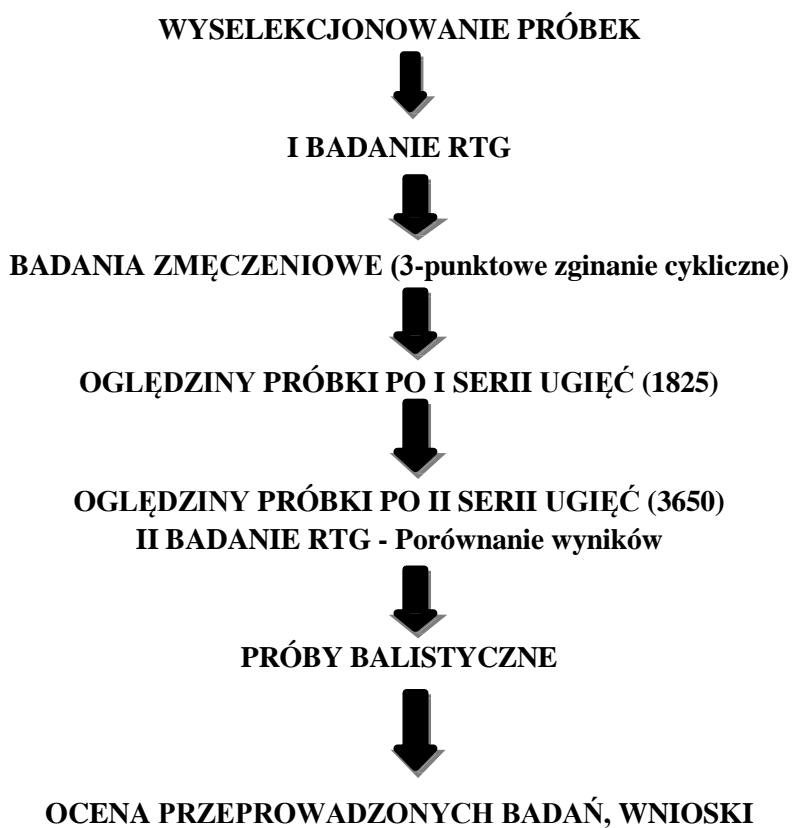
3-punktowe zginanie próbki  
50x50x6 mm



3-punktowe zginanie próbki  
100x50x6 mm

**Fot. 2. Schemat pracy maszyny oraz badane próbki**

bardzo precyzyjnego narzędzia pozwalającego na przeprowadzenie dokładnych i powtarzalnych badań. Schemat programu badań przedstawiono na rys. 1.



**Rys. 1. Schemat programu badań**

## 2.4. Zestawienie próbek i wykonanych badań

W tabeli 3 przedstawiono wytworzone próbki oraz wykonane badania. Wszystkie próbki zostały poddane badaniom przy użyciu diagnostycznego aparatu rentgenowskiego przed i po badaniach zmęczeniowych.

Tabela 3. Wykonane próbki i badania

L.p.	Próbka	Wymiary	Badania Zmęczeniowe		RTG przed i po badaniach zmęczeniowych	Ostrzał
			Ugięcie [mm]	Liczba cykli		
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937	50x50x6	3	3650	TAK	TAK
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937	50x50x12	2	3650	TAK	TAK
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937	50x50x12	3	3650	TAK	TAK
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 900	50x50x6	5	-*	TAK	TAK
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 951	50x50x6	4	3650	TAK	TAK
6	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937	100x50x6	3	3650	TAK	NIE
7	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 900	100x50x6	5	-**	TAK	NIE
8	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 951	100x50x6	4	3650	TAK	NIE

\* - próbka pękła po ok 200 cyklach.

\*\* - próbka o zbyt dużej elastyczności do wykonania badań.

Dodatkowo wykonano próbki z sześciokątnych płytek ceramicznych sklejonych obustronnie za pomocą kleju Terostat 9399 w postaci układów składających się z 13 sztuk. Zestawienie próbek oraz wykonanych badań przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wykonane próbki dodatkowe.

L.p.	Ceramika	Klej	Badania zmęczeniowe	
			Ugięcie [mm]	Liczba cykli
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> : 3 mm	Terostat 9399 2x0,5 mm	5	~200
2	SiC: 7 mm /Aramid	Terostat 9399 2x0,5 mm	1	365
3	SiC - 7 mm /Aramid	Terostat 9399 2x0,5 mm	1,5	365
4	SiC - 7 mm	Terostat 9399 2x0,5 mm	1,0	365
5	SiC - 7 mm	Terostat 9399 2x0,5 mm	1,5	365

Próbki o wymiarach 100x50x6 mm oraz próbki zawierające sześciokątne płytki pomiędzy dwiema warstwami kleju Terostat 9399, wytworzone zostały wyłącznie do badań zmęczeniowych, natomiast próbki o wymiarach 50x50 mm o grubościach 6 i 12 mm zostały dodatkowo poddane badaniom odporności balistycznej.

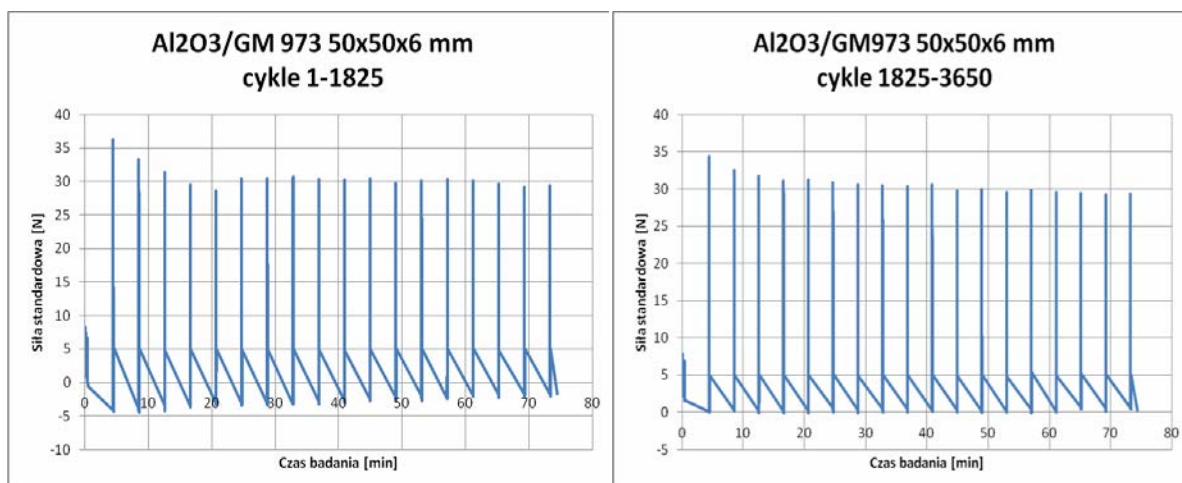
## 3. Wyniki badań

Wyniki badań podzielono na trzy części: badania zmęczeniowe elastycznych próbek zbudowanych z kulek ceramicznych w osnowie poliuretanowej, badania wytrzymałości warstwy kleju na cykliczne zginanie oraz badania odporności balistycznej układów poddanych procesowi zmęczenia.

### 3.1. Wyniki badań zmęczeniowych

Rys. 2 przedstawia przykładowe wykresy zależności siły od czasu dla cyklicznego zginania próbek z jedną warstwą kulek w przypadku ugięcia wynoszącego 3 mm.

Rozbieżność wyników pomiędzy I i II fazą cykli może wynikać z faktu dokonywania oględzin próbek. Po oględzinach, ułożenie próbki mogło ulec nieznacznej zmianie.



Rys. 2. Parametry mierzone podczas badania

Jak już wspomniano, w części dotyczącej programu badań, parametry mierzone podczas cyklicznego zginania mają znaczenie pomocnicze. Podstawowa korzyść wynikająca z zastosowania maszyny wytrzymałościowej polega na możliwości poddania próbek precyzyjnym, a przede wszystkim powtarzalnym obciążeniom cyklicznym, w przybliżeniu oddającym rzeczywiste, długotrwałe użytkowanie. W celu oszacowania wpływu procesu zmęczenia na strukturę materiału wykonane zostały dwa zestawy zdjęć rentgenowskich, przed i po procesie zmęczenia mechanicznego. Zdjęcia wykonane zostały przy użyciu diagnostycznego aparatu rentgenowskiego MV17F 225-9 YXLON. Zestawienie zdjęć rentgenowskich dla wybranych próbek przedstawiono na fot. 3.

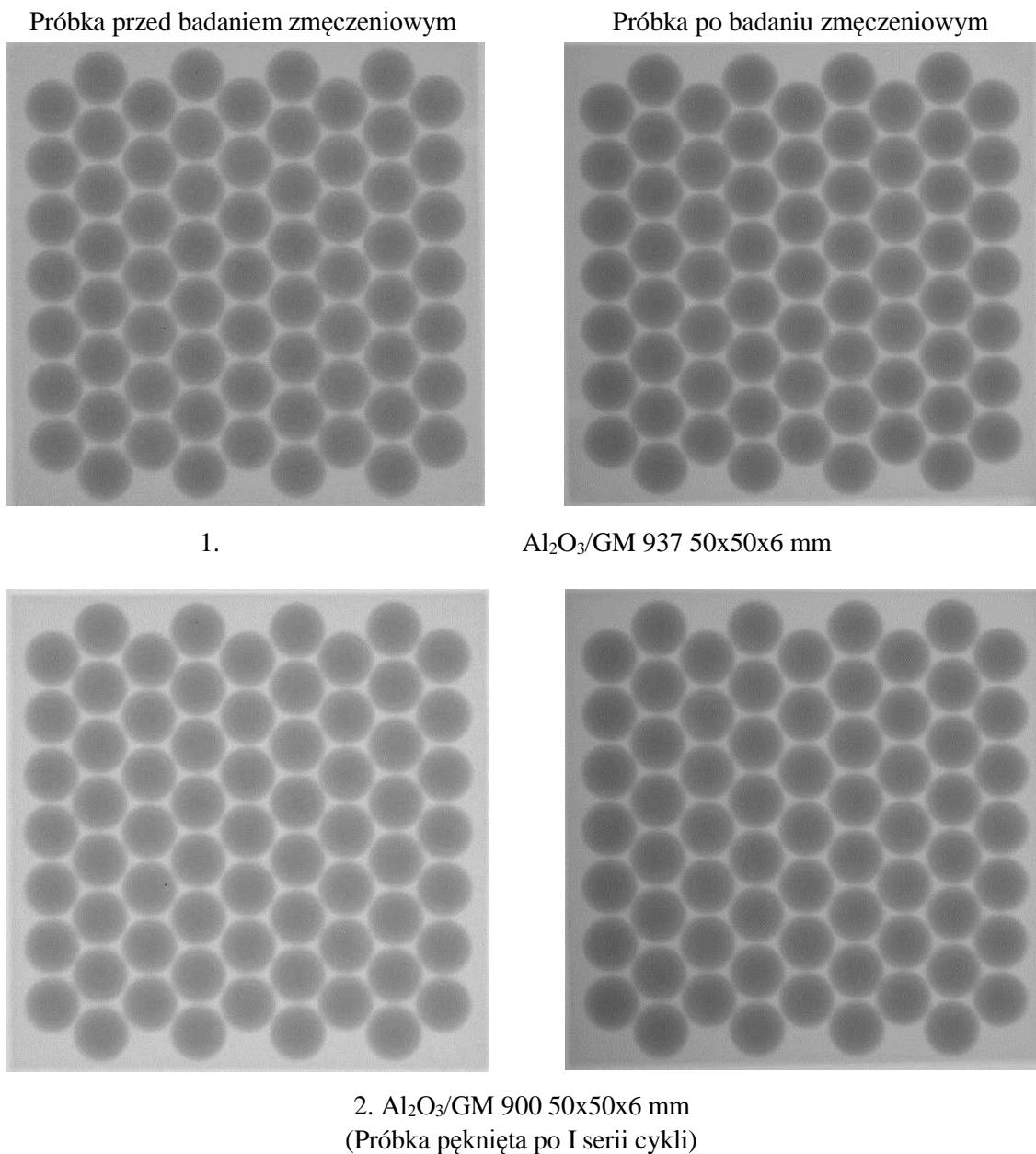
Zdjęcia rentgenowskie wykonane przed i po zmęczeniu próbek wykazały nieskuteczność tej metody do oceny stopnia zmęczenia. Próbki nie wykazują zauważalnych różnic przed i po poddaniu ich procesowi cyklicznego zginania.

### 3.2. Wyniki badań wytrzymałości warstwy kleju Terostat 9399 na cykliczne zginanie

W przypadku próbki zbudowanej z płytek Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> o grubości 3 mm pokrytych obustronnie warstwą kleju Terostat 9399 metoda rentgenowskiego diagnozowania okazała się skuteczna. Dzięki temu, że próbka była wykonana bez dodatkowego poszycia ochronnego, możliwe było zidentyfikowanie pęknięcia kleju na zdjęciu rentgenowskim. Pozwala to przypuszczać, że możliwe byłoby także rozpoznanie pęknięcia podczas prześwietlania próbek o bardziej złożonej budowie. Porównanie zdjęcia próbki i jej obrazu rentgenowskiego pokazano na fot. 4.

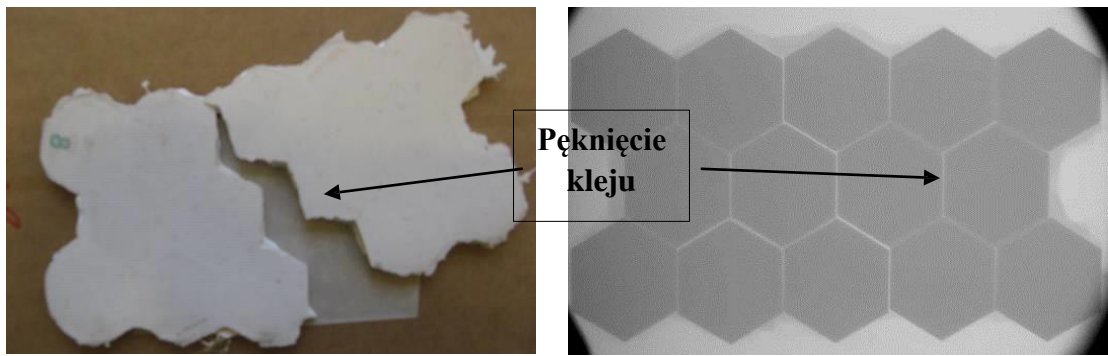
Zarówno opisana powyżej próbka jak i próbki o podobnej budowie, na bazie ceramiki SiC, wykazały pęknięcia warstwy kleju na krawędziach płytek ceramicznych, przy niewielkich wartościach ugięcia i po niewielkiej, w stosunku do próbek ceramika/poliuretan, liczbie cykli zmęczeniowych. W celu zwiększenia odporności warstwy kleju na pękanie można zastosować tkaninę aramidową przyklejoną od spodu układu ceramika/klej. Dzięki

temu zabiegowi naprężenia rozciągające zostają przejęte przez włókna aramidowe. Powoduje to jednak znaczny wzrost siły wymaganej do zgięcia układu, a co za tym idzie, spadek jego funkcjonalnej odkształcalności. Porównanie siły potrzebnej do wygięcia próbki podklejonej aramidem i próbki bez wzmocnienia pokazano na rys. 3.



**Fot. 3. Zestawienie zdjęć rentgenowskich przed i po zmęczeniu**

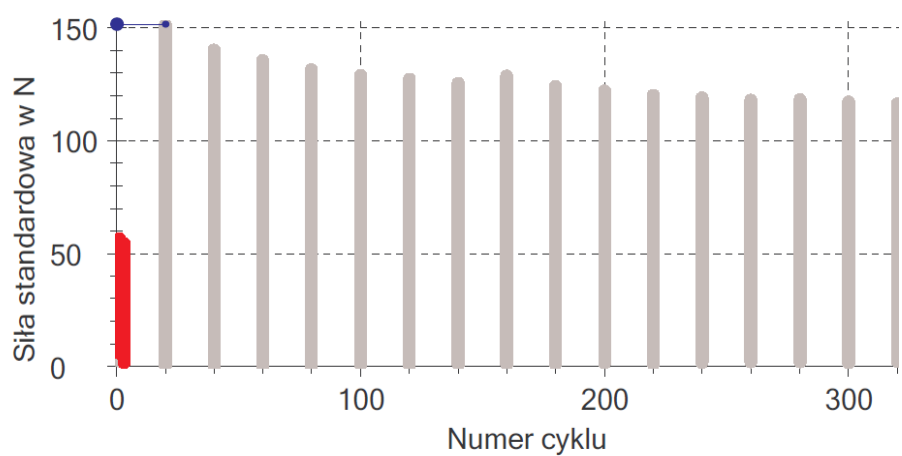




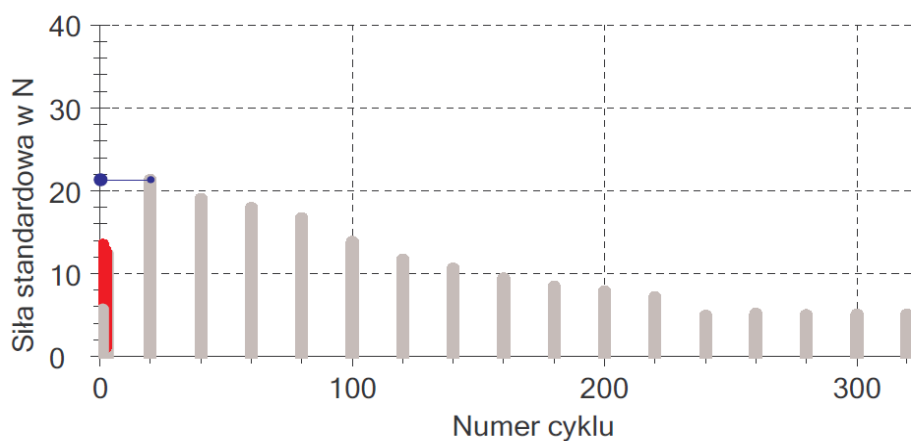
Zdjęcie próbki

Obraz rentgenowski po zmęczeniu

**Fot. 4. Porównanie zdjęcia próbki  $Al_2O_3$ /Terostat 9399 i jej obrazu rentgenowskiego**



Próbka podklejona tkaniną aramidową. Wartość siły maksymalnej 151,5 N



Próbka bez wzmocnienia aramidowego. Wartość siły maksymalnej 21,3 N

**Rys. 3. Porównanie maksymalnych sił potrzebnych do ugięcia próbek**

### 3.3. Wyniki badań odporności balistycznej

Badania odporności balistycznej przeprowadzono zgodnie z przedstawioną wcześniej procedurą. W trakcie badania dokonywano pomiaru prędkości pocisku w odległości 2 m od celu oraz głębokości ugięcia plastycznego podłoża. Wyniki badań odporności balistycznej przedstawiono w tabeli 5.

Przebiecie zanotowano w przypadku próbki ceramiki  $Al_2O_3$  w osnowie żywicy GM 900. Była to próbka, która wykazała pęknięcie poprzeczne podczas pierwszej serii badań zmęczeniowych. Inną przyczyną perforacji próbki, może być fakt, że żywica poliuretanowa GM 900, spośród wszystkich użytych materiałów osnowy, posiada najniższe właściwości mechaniczne, takie jak: twardość, odporność na zerwanie oraz wytrzymałość na rozciąganie. W tabeli 6 zestawiono uzyskane wyniki z wynikami dla analogicznych próbek, które nie zostały poddane procesowi zmęczenia [4].

Zarejestrowano mniejsze wartości odkształcenia podłoża plastycznego dla próbek poddanych zmęczeniu mechanicznemu. Prawdopodobną przyczyną tego zjawiska jest różnica w jakości materiału zastosowanego, jako podkład. Do wykonania próbek użyty został materiał Dyneema® SB21 pochodzący z tegorocznej dostawy, natomiast w przypadku próbek przebadanych wcześniej materiał Dyneema® pochodził z zestawów już raz poddanych badaniu, po odpowiednim przygotowaniu.

Tabela 5. Wyniki badań odporności balistycznej.

L.p.	Próbka	Podkład miękki	M [kg/m <sup>2</sup> ]	G [mm]	V <sub>p</sub> [m/s]	Wynik	U [mm]
1	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937 50x50x6	42 W SB21	21,3	12	699	+	11
2	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937 50x50x12(a)*	21 W SB21	33,9	16	693	+	9
3	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937 50x50x12(b)**	21 W SB21	33,9	16	692	+	10
4	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 900 50x50x6	42 W SB21	21,3	12	691	-	Perforacja
5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 951 50x50x6	42 W SB21	21,3	12	699	+	11

\* - amplituda ugięcia 2 mm, \*\* - amplituda ugięcia 3 mm, M - masa powierzchniowa próbki, G - grubość próbki, U - ugięcie podłoża gliny "+" - zatrzymanie pocisku, "-" perforacja próbki

W nowoczesnych warstwowych osłonach balistycznych zbudowanych z ceramiki i materiałów włóknistych, miękki podkład jest odpowiedzialny za rozproszenie energii i zmniejszenie wartości dynamicznego ugięcia osłony. W przypadku próbek zawierających dwie warstwy ceramiki wartość procentowa powierzchni zniszczonej w wyniku uderzenia pocisku, jest trzykrotnie większa dla próbek poddanych zmęczeniu niż dla materiału wyjściowego niepoddanego zmęczeniu.

Tabela 6. Porównanie wyników badań balistycznych

Parametr	Próbka po zmęczeniu mechanicznym	Próbka niepoddana zmęczeniu mechanicznemu
1. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937, 50x50x6 mm + 42 warstwy SB21		
Pocisk	5,7x28 mm SS190	5,7x28 mm SS190

V <sub>p</sub> [m/s]	699	691
Wynik	+	+
U [mm]	11	20
Zniszczenie [%]	8	8
2. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /GM 937, 50x50x12 mm + 21 warstwy SB21		
Pocisk	5,7x28 mm SS190	5,7x28 mm SS190
V <sub>p</sub> [m/s]	693	687
Wynik	+	+
U [mm]	10	16
Zniszczenie [%]	30	9

"+" - zatrzymanie pocisku

Przeprowadzone badania odporności balistycznej wykazują, że cykliczne obciążenia zmęczeniowe mają wpływ na właściwości ochronne układów balistycznych. Wszystkie badane próbki skutecznie zatrzymywały pocisk SS190, jednak procentowa wartość powierzchni zniszczonej dla próbek poddanych zmęczeniu, była 3-krotnie wyższa dla układu nr 2 (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/GM 937, 50x50x12 mm + 21 warstwy SB21).

#### 4. Wnioski

Na podstawie wyników wszystkich przeprowadzonych badań można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Maszyna wytrzymałościowa Zwick-Roel Z100 może być wykorzystana, jako precyzyjne narzędzie służące do wykonania cyklicznych badań zmęczeniowych w sposób dokładny i powtarzalny. Program badawczy TestExpert daje duże możliwości w zakresie doboru parametrów badania.
2. W przypadku próbek zbudowanych z kulek ceramicznych w matrycy dwuskładnikowej żywicy poliuretanowej zdjęcia rentgenowskie nie są skuteczne w określeniu wpływu zmęczenia mechanicznego na strukturę. Zdjęcia wykonane przed i po procesie zmęczenia nie wykazały zauważalnych różnic. Należy znaleźć inną metodę skutecznego diagnozowania próbek.
3. Zdjęcia rentgenowskie mogą okazać się bardzo pomocne przy wykrywaniu pęknięć w powierzchni kleju przy oględzinach wkładów kamizelkowych zawierających klejoną ceramikę.
4. Przeprowadzone badania zmęczeniowe wykazały wpływ cyklicznych odkształceń na odporność balistyczną elastycznych kompozycji materiałowych ceramika/żywica poliuretanowa. Wykonane próbki zatrzymały pocisk 5,7x28 mm SS190 wykazując wartości ugięcia 10-11 mm, mieszcząc się w wymaganiach stawianych przez odpowiednią normę [2].  
W przypadku układów z dwiema warstwami kulek, wartość powierzchni zniszczenia była trzykrotnie większa niż takich samych próbek niepoddanych zmęczeniu.
5. Badania balistyczne wykazały również różnicę wartości dynamicznego ugięcia podłoża plastycznego wynoszącą 6 - 9 mm dla próbek zawierających podkład polietylenowy różniący się okresem przechowywania. Konieczne wydaje się przeprowadzenie zmęczeniowych badań wkładów polietylenowych, analogicznie do wykonanych wcześniej badań wkładów aramidowych.
6. Przeprowadzone badania zmęczeniowe wykazały małą odporność na cykliczne zginanie próbek wykonanych z płytek ceramicznych dwustronnie sklejonych polimerowym klejem

dwuskładnikowym Terostat 9399. Zaobserwowano pękanie powierzchni kleju przy niewielkich wartościach amplitudy ugięcia wynoszących 2 mm i niewielkiej, w stosunku do próbek ceramika-poliuretan, liczbie cykli zmęczeniowych wynoszącej 300. Rozwiązaniem tego problemu może być pokrycie warstwy kleju materiałem dobrze przekazującym naprężenia zginające.

7. Opisane badania mają charakter wstępny i będą kontynuowane.

## Literatura

- [1] Habaj W.: Bezinwazyjna metoda oceny stanu technicznego wkładów balistycznych do kamizelek kuloodpornych., *Problemy Techniki Uzbrojenia*, 99, s. 103, Zielonka 2006.
- [2] PN-V-87000:2011: Osłony balistyczne lekkie. Kamizelki kulo- i odłamkoodporne. Wymagania i badania.
- [3] Zubik T., Stępnia W.: Badania wpływu warunków użytkowania kamizelek kuloodpornych na właściwości balistyczne., *Problemy Techniki Uzbrojenia*, 100, s. 129, Zielonka 2006.
- [4] Sprawozdanie z badań nr 7021/C/2012 "Opracowanie nowej generacji elastycznych wkładów balistycznych do kamizelek kuloodpornych o odporności balistycznej w klasie K3 oraz specjalnej wg PN-V-87000:2011". Archiwum WITU.