

Zbigniew STEMPIEŃPOLITECHNIKA ŁÓDZKA, KATEDRA ODZIEŻOWNICTWA I TEKSTRONIKI
ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź**System do szybkiej rejestracji stożka odkształcenia podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny kamizelki kuloodpornej**

Dr inż. Zbigniew STEMPIEŃ

Jest adiunktem w Katedrze Odzieżownictwa i Tekstroniki Politechniki Łódzkiej. Główna działalność naukowa dr inż. Zbigniewa Stempnia związana jest z badaniami w zakresie barierowości balistycznej tekstyliów, tekstroniki pozwalającej na kreowanie tekstyliów inteligentnych, funkcjonalizacji tekstyliów poprzez nanoszenie nadruków, instrumentacji pomiarów wielkości związanych z identyfikacją obiektów włókienniczych.



e-mail: stemp@p.lodz.pl

Streszczenie

Badania rozwoju stożka odkształcenia w aspekcie uderzenia balistycznego podczas niepenetrującego uderzenia pocisku, wymagają jego obserwacji z zastosowaniem kamery o prędkości rejestracji do miliona obrazów/s i czasie obserwacji do 1000ms. Współczesne systemy do szybkiej rejestracji obrazów rzędu miliona obrazów/s, bazują głównie na zastosowaniu kilku sensorów CCD. Wadą tych systemów jest mała liczba obrazów rejestrowanych w pojedynczej sekwencji, do 128, oraz wysoka cena. W artykule zaprezentowano autorski system do analizy stożka odkształcenia pozwalający na rejestrację z prędkością do 1 miliona obrazów/s. Liczba obrazów rejestrowanych w pojedynczej sekwencji może być powyżej 100000.

Słowa kluczowe: kamizelka kuloodporna, uderzenie pocisku, stożek deformacji, szybka rejestracja obrazu, przetwornik PSD.

High-speed digital imaging system for analyzing of ballistic body armour deformation during bullet stroking**Abstract**

The research concerning verification of the developed ballistic packets was devoted to testing the absorbed amount of kinetic energy of the bullet and forming the cone deformation during the stroke in real time. Development of cone deformation to the maximum height can be reached in the range time of 50-1000 μ s. Research of cone deformation in view point of negative physiological effects in a human torso requires applying of camera with a scanning rate up to 1 million scans/s and recording time up to 1000 μ s. Accessible high-speed imaging systems with the scanning rate up to 1 million scans/s mainly base on the using of a few CCD sensors and light-dividing prism or using of CCD sensors built in Frame Transfer technology. Disadvantages of such systems are very few numbers of images recorded in the one scan, less than 128, and high price. A novel, three-dimensional system registering in real time the deformation of the ballistic packet during the stroke was proposed. The measuring method is based not on registering a series of images but on a continuous numerical recording of the displacement of the selected element of the deformation cone in relation to the initial plane of the sample. Reconstruction of the cone deformation is performed by using approximation algorithms based on artificial neural networks. Presented system allows acquiring cone deformation with the rate of 1 million scans/s. The number of images, which are recorded in the one scan, can be more than 100000.

Keywords: body armour, bullet stroking, cone deformation, high-speed digital imaging, PSD sensor.

1. Wstęp

Analiza eksperymentalna kształtowania się stożka odkształcenia w pakiecie balistycznym podczas uderzenia pocisku jest bardzo trudna w praktycznej realizacji. W przypadku uderzenia pocisku Parabellum 9 mm lecącego z prędkością 360 m/s w pakiet bali-

styczny złożony z warstw tkanin aramidowych, maksymalna amplituda stożka odkształcenia występuje po czasie około 10 μ s dla pakietu złożonego z 2-3 warstw i 1000 μ s dla pakietów złożonych z ponad 20 warstw od momentu zderzenia się pocisku z pakietem. Oznacza to, że badania deformacji pakietów balistycznych w szerokim zakresie zmian ich mas powierzchniowych, wymagają rejestracji zjawiska z prędkością nawet do 1 miliona obrazów na sekundę.

W literaturze podawane są pojedyncze zdjęcia stożka odkształcenia realizowane w impulsowym świetle widzialnym. Metody tam stosowane nie dają możliwości uzyskania ciągłego zapisu potrzebnego do zaawansowanej analizy rozchodzenia się fali poprzecznej oddziaływującej w przypadku kamizelek kuloodpornych na ciało człowieka.

Pierwsze systemy szybkiej rejestracji obrazu bazowały na szybkiej fotografii. Dane literaturowe podają, że prędkość zapisu może w tych kamerach wynosić do 2 milionów obrazów/sekundę. Niestety nie jest to potwierdzone publikacjami.

W ostatnich latach zaczęto stosować kamery CCD do wykonywania szybkich zdjęć [1]. Jednym z rozwiązań jest zastosowanie przyzmatu rzutującego obraz na kilka światłoczułych sensorów CCD. Odpowiednie sterowanie tymi sensorami umożliwi wykonywanie zdjęć z prędkością nawet do 2 milionów na sekundę. Zastosowanie tej techniki jest jednak bardzo drogie, ponieważ wymagana jest duża liczba sensorów CCD oraz ich układów przetwarzania. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie sensorów CCD z architekturą Frame Transfer. Matryca tego sensora składa się z dwóch części - światłoczułej odsłoniętej i drugiej zasłoniętej zwanej pamięcią. Zasłonięta matryca służy do bardzo szybkiego przekopiowania ładunku elektrycznego zgromadzonego w matrycy odsłoniętej. W zależności od liczby matryc zasłoniętych, można wykonać od 1 do 32 zdjęć z prędkością 1-2 mln/sek. Zastosowanie tych kamer ogranicza mała liczba zdjęć w pojedynczej sekwencji oraz bardzo duża cena, na poziomie 1 mln zł.

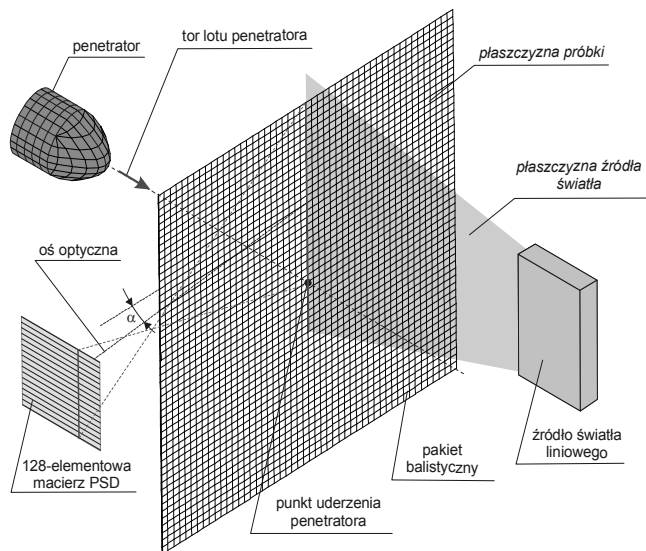
Obecnie trwają prace nad nowymi konstrukcjami kamer do ultra szybkiej rejestracji. W jednym z rozwiązań zastosowane jest zjawisko fotoelektryczne, w którym strumień fotonów obrazowych generuje strumień elektronów wzmacniany następnie około 100000 razy za pomocą powielacza [2]. Skrócono czas naświetlania w stosunku do szybkich kamer CCD, w przybliżeniu tyle razy, ile wynosi wzmocnienie strumienia elektronów. W literaturze podawany jest minimalny czas naświetlania na poziomie 1,2 ns, a maksymalna prędkość zapisu wynosi 500 milionów obrazów/sekundę.

Współczesne systemy do szybkiej rejestracji obrazu bazują głównie na technologii CCD. Pozwalają one na rejestrację obrazu z prędkościami powyżej 1 mln obrazów/s. Problemem w zastosowaniach tych systemów jest jednak ich cena na poziomie 1-5 mln zł oraz mała liczba obrazów rejestrowanych w pojedynczej sekwencji, do 128.

2. Idea działania systemu rejestracji

W ramach realizacji badań nad rozwojem stożka odkształcenia podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny zaproponowano zupełnie odmienne, nowatorskie podejście do trójwymiarowej analizy stożka odkształcenia w czasie rzeczywistym. Metoda pomiarowa nie bazuje na rejestracji ciągu obrazów, lecz na ciągłym numerycznym zapisie wielkości przemieszczenia wybranej tworzącej stożka odkształcenia w stosunku do płaszczyzny próbki. Płaszczyznę próbki wyznacza położenie jej obserwowanej war-

stwy zewnętrznej przed procesem deformacji. Ideę metody pomiarowej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Idea rejestracji deformacji pakietu balistycznego podczas uderzenia pocisku

Fig. 1. The idea of registration of ballistic packet deformation during bullet stroking

Wybrana tworząca stożka odkształcenia jest oświetlana za pomocą źródła światła liniowego. Kierunek strumienia światła jest prostopadły do płaszczyzny próbki i przechodzi przez punkt uderzenia pocisku. Położenie podświetlonej tworzącej stożka odkształcenia jest analizowane w płaszczyźnie źródła światła, za pomocą układu optycznego z optoelektronicznym sensorem macierzowym PSD (Position Sensitive Detector), składającym się ze 128 pojedynczych jednowymiarowych elementów PSD. Oś optyczna tego układu jest odchylona względem płaszczyzny próbki o kąt $\alpha > 0$. Na światłoczułych elementach przetwornika macierzowego PSD, poprzez układ optyczny tworzy się obraz podświetlonej tworzącej stożka odkształcenia. Pojedynczy sensor PSD dokonuje pomiaru położenia w płaszczyźnie źródła światła tego punktu podświetlonej tworzącej, z którego odbite światło pada na jego światłoczułą powierzchnię.

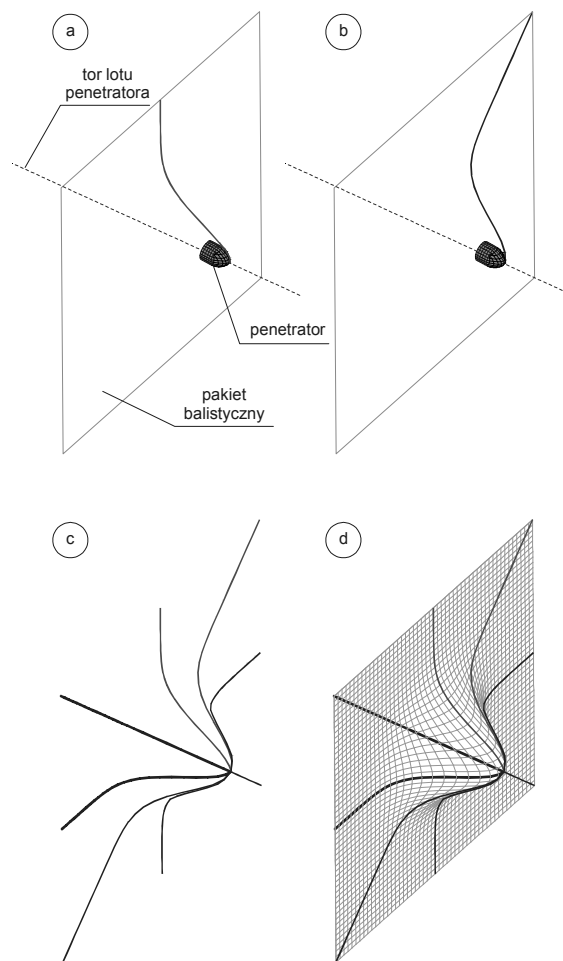
Wizualizację przestrzenną stożka odkształcenia dla wybranej chwili czasowej, dokonuje się poprzez proces rekonstrukcji (rys. 2). Proces ten uwzględnia wyniki pomiarów położenia wybranych tworzących pakietu balistycznego uzyskane za pomocą prezentowanego systemu. W przypadku pakietów balistycznych złożonych z warstw tkanin, pierwszym etapem procesu rekonstrukcji jest pomiar deformacji tworzącej stożka odkształcenia w płaszczyźnie źródła światła przechodzącej przez tor lotu pocisku i równoległej do układu osnowowego lub wątkowego (rys 2a).

W drugim etapie procesu rekonstrukcji dla nowego pakietu balistycznego, posiadającego identyczną strukturę warstwową i surowcową, dokonuje się pomiaru deformacji tworzącej stożka odkształcenia w płaszczyźnie źródła światła przechodzącej przez tor lotu pocisku i obróconej o kąt 45° w stosunku do układu osnowowego lub wątkowego (rys 2b).

W trzecim etapie procesu rekonstrukcji (rys. 2c), wyniki pomiarów deformacji tworzącej stożka odkształcenia dla kąta 0° , powieła się dla tworzących 90° , 180° i 270° . Z kolei wyniki pomiarów deformacji tworzącej stożka odkształcenia dla kąta 45° , powieła się dla tworzących 135° , 225° i 315° . Zakładana jest tutaj symetria własności pakietu balistycznego względem obu układów nitki.

W czwartym etapie procesu rekonstrukcji, stosuje się algorytm aproksymujący obliczający wysokość stożka odkształcenia względem jego podstawy dla dowolnych punktów powierzchni stożka (rys. 2d). W ramach realizacji badań nad deformacją pakietów balistycznych, zastosowano aproksymator w postaci sztucznych sieci neuronowych. Do przestrzennej wizualizacji stożka odkształ-

cenia w wybranej chwili czasowej można zastosować oprogramowanie do generowania powierzchni 3D, np. Surfer. W przypadku analizy dynamicznej stożka odkształcenia, można zastosować oprogramowanie do animacji komputerowej.



Rys. 2. Rekonstrukcja stożka odkształcenia: a) deformacja pakietu w płaszczyźnie 0° ; b) deformacja pakietu w płaszczyźnie 45° ; c) deformacja w płaszczyznach pośrednich; d) widok rekonstrukcji stożka odkształcenia

Fig. 2. Reconstruction of the cone deformation: a) packet deformation in plane of 0° ; b) packet deformation in plane of 45° ; c) deformation in indirect planes; d) reconstruction view of cone deformation

3. Matematyczny opis metody pomiarowej

Opracowanie koncepcji pomiaru deformacji pakietu balistycznego podczas uderzenia pocisku, narzuciło potrzebę zaprojektowania odpowiedniego toru optycznego, pozwalającego na uzyskanie obrazu przemieszczenia obserwowanego punktu tworzącej stożka odkształcenia na światłoczułej powierzchni jednego ze 128 elementów matrycy PSD. Przedstawiona idea pomiaru deformacji pakietu balistycznego narzuca na układ optyczny następujące wymagania:

- kąt obserwacji przemieszczeń punktów leżących na analizowanej tworzącej stożka odkształcenia względem płaszczyzny próbki przez układ optyczny musi być większy od 0 ,
- odległość obiektywu od strefy analizowanej (toru lotu pocisku) powinna wynosić $30-50$ cm ze względu na możliwość uszkodzenia aparatury,
- ogniskowa obiektywu musi być tak dobrana, aby połowa przekątnej próbki pakietu balistycznego miała całkowity obraz na światłoczułej płaszczyźnie matrycy PSD przy zachowaniu wymaganej odległości obiektywu od toru lotu pocisku.

Na rys. 3 przedstawiono powstawanie obrazu wybranego punktu leżącego na analizowanej tworzącej stożka odkształcenia podczas deformacji pakietu balistycznego, w układzie optycznym uwzględniającym powyższe wymagania. Zastosowano następujące oznaczenia:

d_p - odległość przedmiotowa,

d_o - odległość obrazowa,

f - ogniskowa obiektywu,

h_s - przemieszczenie obserwowanego punktu względem płaszczyzny próbki,

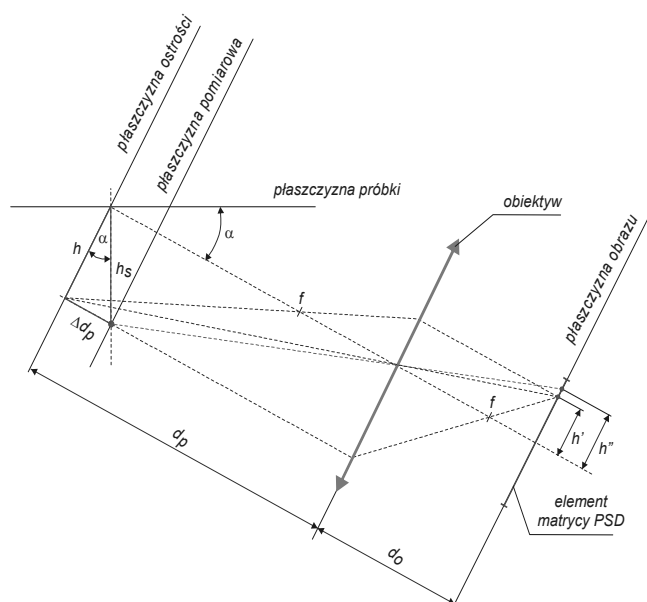
h - przemieszczenie obserwowanego punktu na płaszczyźnie ostrości,

Δd_p - zmiana odległości przedmiotowej podczas uderzenia pocisku,

h' - obraz przemieszczenia obserwowanego punktu na płaszczyźnie ostrości,

h'' - mierzony obraz przemieszczenia obserwowanego punktu na płaszczyźnie pomiarowej,

α - kąt obrotu układu optycznego względem płaszczyzny próbki.



Rys. 3. Powstawanie obrazu na elemencie matrycy PSD
Fig. 3. Image generation on the element of PSD matrix

Następnie wyznaczono równanie matematyczne pozwalające na obliczenie przemieszczenia wybranego punktu leżącego na analizowanej tworzącej stożka odkształcenia podczas deformacji pakietu balistycznego. Ponieważ kąt obserwacji przez układ optyczny przemieszczeń punktów leżących na analizowanej tworzącej stożka odkształcenia względem płaszczyzny próbki musi być większy od 0, płaszczyzna pomiarowa na której w danej chwili czasowej znajduje się obserwowany punkt, nie będzie pokrywać się z płaszczyzną ostrości, natomiast będzie zmieniać swoje położenie w zależności od amplitudy przemieszczenia h_s .

Dla płaszczyzny ostrości (rys. 3) spełnione jest równanie soczewki, mamy więc:

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_o} + \frac{1}{d_p} \quad (1)$$

Stosunek obrazu przemieszczenia obserwowanego punktu h' do przemieszczenia obserwowanego punktu na płaszczyźnie ostrości definiuje powiększenie układu optycznego A :

$$A = \frac{h'}{h} = \frac{d_o}{d_p} \quad (2)$$

Na podstawie zależności (1) powiększenie A wynosi:

$$A = \frac{h'}{h} = \frac{f}{d_p - f} \quad (3)$$

Korzystając z zależności (3), przemieszczenie h na płaszczyźnie ostrości, na podstawie przemieszczenia h' można wyznaczyć ze wzoru:

$$h = \frac{h'(d_p - f)}{f} \quad (4)$$

Na skutek uderzenia pocisku następuje przemieszczenie obserwowanego punktu z płaszczyzny ostrości o wartość h_s . Znajduje się on teraz w płaszczyźnie pomiarowej znajdującej się przed planem ostrym. W układzie optycznym oznacza to zmianę odległości przedmiotowej o wartość Δd_p , którą można obliczyć ze wzoru:

$$\Delta d_p = h \cdot \tan \alpha \quad (5)$$

Ponieważ ogniskowa układu optycznego f oraz odległość obrazowa d_o nie ulegają zmianie, następuje utrata ostrości obrazu oraz zmiana powiększenia. W nowych warunkach układu optycznego, przemieszczenie h będące rzutem przemieszczenia h_s na płaszczyznę pomiarową, można obliczyć na podstawie obrazu przemieszczenia h'' ze wzoru (4), mamy więc:

$$h = \frac{h''(d_p - \Delta d_p - f)}{f} \quad (6)$$

Po podstawieniu zależności (5) przemieszczenie h wynosi:

$$h = \frac{h''(d_p - f)}{f + h'' \cdot \tan \alpha} \quad (7)$$

Znając wartość przemieszczenia h , przemieszczenie h_s wybranego punktu, leżącego na analizowanej tworzącej stożka odkształcenia podczas deformacji pakietu balistycznego, można obliczyć z zależności:

$$h_s = \frac{h}{\cos \alpha} \quad (8)$$

Po podstawieniu zależności (7) mamy:

$$h_s = \frac{1}{A \cdot \left(\frac{\cos \alpha}{h''} + \frac{\sin \alpha}{f} \right)} \quad (9)$$

Analizowano z kolei pomiar przemieszczenia h'' na powierzchni światłoczułej pojedynczego elementu matrycy PSD. Na rys. 4 przedstawiono przekrój poprzeczny takiego elementu z zaznaczoną wiązką światła padającego na jego światłoczułą powierzchnię.

Z zasady działania pojedynczego elementu PSD wynika, że:

$$h'' = \frac{L_{PSD}}{2} \cdot \frac{I_2 - I_1}{I_2 + I_1} \quad (10)$$

W celu pomiaru prądów I_1 oraz I_2 , zastosowano wzmacniacze prądowo-napięciowe. Z zasady działania wzmacniaczy transkonduktancyjnych otrzymujemy napięcia wyjściowe określone następującymi zależnościami:

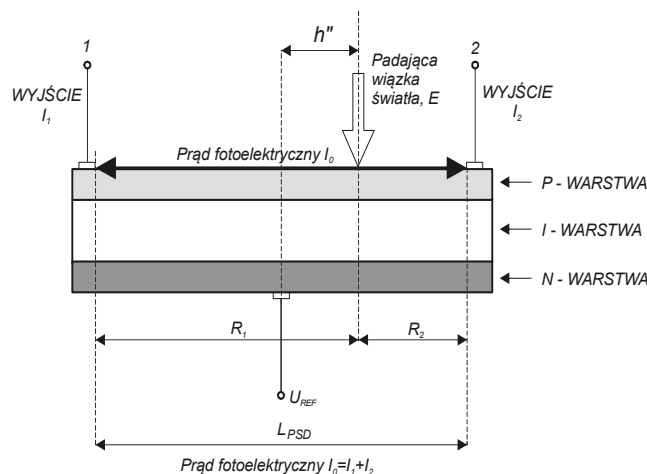
$$U_1 = I_1 \cdot R_f$$

oraz

$$U_2 = I_2 \cdot R_f, \quad (11)$$

gdzie R_f jest wartością rezystancji w pętli sprzężenia zwrotnego obu wzmacniaczy prądowo-napięciowych. Podstawiając te zależności do wzoru (10) mamy:

$$h'' = \frac{L_{PSD}}{2} \cdot \frac{U_2 - U_1}{U_2 + U_1}. \quad (12)$$



Rys. 4. Przekrój poprzeczny pojedynczego elementu matrycy PSD
Fig. 4. Cross section of single element of PSD matrix

W celu obliczenia przemieszczenia obserwowanego punktu tworzącej stożka odkształcenia h_s , zależność (11) podstawiamy do zależności (9).

Otrzymujemy wtedy:

$$h_s = \frac{1}{A \cdot \left(\frac{2 \cos \alpha}{L_{PSD}} \cdot \frac{U_2 + U_1}{U_2 - U_1} + \frac{\sin \alpha}{f} \right)}. \quad (13)$$

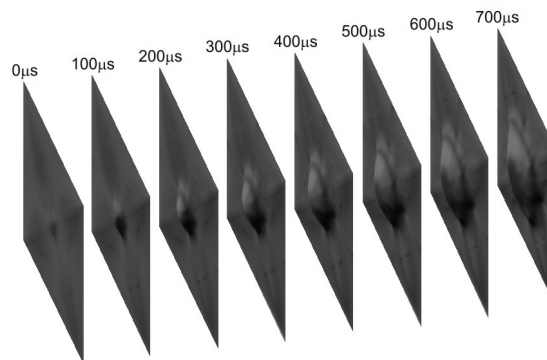
Powyższa zależność oznacza, że do obliczenia przemieszczenia h_s procedura pomiarowa musi uwzględniać:

- pomiar napięć U_1 i U_2 na wyjściach wzmacniaczy prądowo-napięciowych,
- pomiar kąta obserwacji α układu optycznego względem płaszczyzny próbki,
- pomiar powiększenia układu optycznego obiektów znajdujących się w płaszczyźnie ostrości lub w przyjętej płaszczyźnie początkowej,
- pomiar ogniskowej f obiektywu,
- stałą wartość L_{PSD} będącą całkowitą długością pojedynczego elementu PSD.

Na rys. 5 przedstawiono przykład rekonstrukcji stożka odkształcenia podczas uderzenia pocisku Parabellum 9 mm lecącego z prędkością 360 m/s w pakiet balistyczny złożony z 16 warstw tkanin aramidowych Twaron CT 709.

Otrzymane wyniki pomiarów pozwalają na analizę kolejnych faz rozwoju stożka odkształcenia. Możliwa jest analiza takich parametrów jak: wysokość stożka odkształcenia, obszar o niezrownym odkształceniu, prędkość deformacji. Pozwala to na opty-

malizację barier balistycznych dla których wartości tych parametrów powinny być minimalne.



Rys. 5. Przykład wizualizacji deformacji pakietu balistycznego
Fig. 5. Example of visualization of body armour deformation

4. Ocena niedokładności pomiaru

Do oceny niedokładności wyznaczenia przemieszczenia obserwowanego punktu wykorzystano teorię niepewności [3]. Za miarę niedokładności wyznaczenia przemieszczenia obserwowanego punktu należącego do tworzącej stożka odkształcenia podczas uderzenia pocisku przyjęto niepewność rozszerzoną określoną wzorem:

$$U(h_s) = k_p \cdot u_C(h_s), \quad (14)$$

gdzie k_p jest współczynnikiem rozszerzenia ($k_p=2$ dla poziomu ufności 0,95) a $u_C(h_s)$ jest złożoną niepewnością standardową estymaty h_s . Ze względu na pomiar pośredni przemieszczenia, złożoną niepewność $u_C(h_s)$ obliczono na podstawie prawa propagacji niepewności zakładając, że zmienne wejściowe są nieskorelowane. Na tej podstawie oszacowano, że dla opracowanego systemu maksymalna niepewność rozszerzona pomiaru deformacji pakietu balistycznego podczas uderzenia pocisku wynosi 2,3 mm.

5. Podsumowanie

Opracowany system szybkiej rejestracji pozwala na zobrazowanie deformacji pakietu balistycznego podczas uderzenia pocisku w czasie rzeczywistym. Prędkość skanowania może być na poziomie 1 mln obrazów/s a liczba rejestrowanych obrazów w pojedynczej sekwencji nawet do 100000. Jest to wartość nieosiągalna dla współcześnie dostępnych kamer do szybkiej rejestracji.

6. Literatura

- [1] Hiller W.J., Kowalewski T.A., Tatarczyk T.: High speed frame transfer CCD, Proc. 20th Int. Congr. of High Speed Photography and Photonics, 21-25. Sept. 1992 Victoria, Canada.
- [2] Weber K., Karmali M.: High-Speed Cameras, Laser Focus World, www.optoelectronics-world.com.
- [3] Stempień Z.: Strukturalna barierowość balistyczna tekstyliów, Monografia Naukowa, Politechnika Łódzka, 2009.