

JUSTYNA PINKOS
Wydział Technologii Materiałowych
i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej

MODELOWANIE WIELOWARSTWOWYCH OSŁON BALISTYCZNYCH MINIMALIZUJĄCYCH SKUTKI UDARU

Promotor: **dr hab. inż. Zbigniew Stempień, prof. PŁ**

Recenzenci: **dr hab. inż. Marcin Henryk Struszczyk, prof. ITB**
„MORATEX”
dr hab. inż. Katarzyna Grabowska, prof. PŁ

Głównym celem przedstawionej rozprawy doktorskiej była analiza efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych osłon złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych oraz ocena skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku. Badania efektywności balistycznej wielowarstwowych osłon balistycznych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych podanych ostrzałowi pociskiem Parabellum 9 x 19 mm FMJ przeprowadzono w oparciu o symulacje komputerowe w programie LS-Dyna oraz eksperymentalnie w Laboratorium Badań Balistycznych na Politechnice Łódzkiej.

Tkaniny dwuosioowa i trójosiowa były wykonane z tej samej przędzy, posiadały porównywalną masę powierzchniową, natomiast różniły się jedynie typem splotu. W badaniach numerycznych modele przeplatane tkanin opracowano w oparciu o rzeczywiste wymiary tkaniny dwuosioowej i trójosiowej Kevlar 29. Model 3D tkaniny dwuosioowej i trójosiowej opracowano w programie Ansys ICEM CFD. Badania numeryczne przeprowadzono dla modeli przeplatanych warstw tkanin dwuosioowych oraz trójosiowych. Dla wyselekcjonowanych wielowarstwowych pakietów przeprowadzono symulacje centralnego uderzenia pocisku z prędkością początkową 406 m/s, co oznacza, że badania prowadzono w klasie kuloodporności II pakietów balistycznych zgodnie z normą NIJ Standard (2008). Realizacja badań numerycznych dla pakietów wielowarstwowych z tkanin dwuosioowych oraz trójosiowych Kevlar 29 pokazała skalę problemu związanego z czasochłonnością wykonywania analiz numerycznych. Dlatego też zdecydowano się na kolejny etap badań numerycznych polegający na zastąpieniu przeplatane modelu geometrycznego tkaniny modelem 2D o strukturze zhomogenizowanej. Badania numeryczne oceny efektywności balistycznej zhomogenizowanych wielowarstwowych powłok 2D dla pakietów z tkanin dwu- i trójosiowych umożliwiły wyznaczenie

wymaganej liczby warstw spełniającej pierwsze i drugie kryterium bezpieczeństwa.

Efektywność balistyczna miękkich pakietów formowanych z płaskich wyrobów włókienniczych ma istotny wpływ na skalę udaru balistycznego powstającego podczas niepenetrującego uderzenia pocisku (ang. *BABT – Behind Armor Blunt Trauma*). W celu określenia efektywności balistycznej pakietów balistycznych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych przeprowadzono eksperymentalną analizę traumy balistycznej z użyciem podłoża z plasteliny balistycznej i żelu balistycznego. W dalszej kolejności opracowano numeryczny model korpusu ciała człowieka na podstawie sekwencji obrazów z tomografu komputerowego. Weryfikacja wyników badań numerycznych wiązała się z przygotowaniem fizycznego modelu ciała człowieka o rzeczywistych wymiarach klatki piersiowej mężczyzny. Uzyskane rezultaty pozwoliły na przeprowadzenie szczegółowej analizy fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku. Eksperymentalna i numeryczna analiza uderzenia pocisku w model ciała człowieka wykazała, że ciśnienia oraz głębokość deformacji wywierane na określone organy są zawsze mniejsze w przypadku ochrony ciała pakietem balistycznym złożonym z tkanin trójosiowych.

1. PROBLEMATYKA BADAŃ

Tekstylne osłony balistyczne, do których zalicza się kamizelki kuloodporne, decydują w wielu przypadkach o życiu osób podejmujących działania w obronie prawa, uczestniczących w działaniach militarnych oraz publicznie znanych. W chwili uderzenia pocisku w kamizelkę kuloodporną następuje proces pochłaniania energii kinetycznej penetratora przez tekstylną strukturę wielowarstwową. Temu procesowi towarzyszy deformacja pakietu balistycznego, która prowadzi do udaru balistycznego oddziałującego bezpośrednio na ciało człowieka. Z generowaniem udaru balistycznego związane jest ryzyko wystąpienia zewnętrznych i wewnętrznych obrażeń powodujących zaburzenia w funkcjonowaniu organizmu, które w zależności od skali mogą być przyczyną ciężkiego kalectwa, eliminującego osobę z życia zawodowego, lub w skrajnych przypadkach prowadzić do śmierci. Obrażenia ciała człowieka na skutek szybkiej deformacji tekstylnego pakietu balistycznego w publikowanych artykułach Carrolla i in. (1978) i Cannona (2001) określono pojęciem *Behind Armour Blunt Trauma (BABT)*. Stwierdzono, że skala zjawiska traumy balistycznej zależy głównie od parametrów stożka odkształcenia oraz anatomicznej lokalizacji trafienia penetratora.

Publikowane prace badawcze dotyczące analizy zjawiska traumy balistycznej pokazują, iż podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w kamizelkę kuloodporną chroniącą ciało człowieka istnieje ryzyko pojawienia się obrażeń zewnętrznych i wewnętrznych w klatce piersiowej i w jamie brzusznej o różnej

skali. Mechanizm obrażeń powstały w wyniku szybkiej deformacji tekstylnej osłony balistycznej może prowadzić do wystąpienia podbiegnięć krwawych nie tylko w obrębie skóry, ale także w obrębie narządów wewnętrznych, takich jak: płuca, serce czy wątroba. Podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w przednią część klatki piersiowej chronionej przez tekstylny pakiet balistyczny może dojść do złamania żebra, mostka, zmiany w płucach w postaci pasmowych wylewów krwi oraz defragmentacji mięszu płuc prowadzącego do przedostania się powietrza do jamy opłucnej, czyli wystąpienia odmy opłucnej. Przedstawione w literaturze badania skali zjawiska traury balistycznej pokazują, że jest to zagadnienie stanowiące aktualny problem podczas użytkowania tekstylnych wielowarstwowych osłon balistycznych.

Niezwykle obiecującymi strukturami tekstylnymi do zastosowań w miękkich pakietach balistycznych są tkaniny wieloosiowe. Ponieważ dotychczasowe badania pokazują, że struktura geometryczna tkaniny, obok użytego surowca, ma wpływ na jej efektywność balistyczną, należy sądzić, że tekstylne struktury wieloosiowe mogą prowadzić do zmniejszenia skali traury balistycznej. W porównaniu z tradycyjnymi tkaninami dwuosiowymi mogą one zawierać w swojej strukturze więcej niż dwa wzajemnie przeplatające się układy nitek. Podczas uderzenia pocisku w tkaninę wieloosiową fala uderzeniowa rozchodzi się promieniowo wzdłuż wszystkich układów powodując, że obszar tkaniny absorbujący energię kinetyczną pocisku jest znacznie większy niż w tkaninach dwuosiowych. Może to znacząco wpływać na parametry powstającego stożka odkształcenia i w konsekwencji na fizjologiczne skutki udaru balistycznego.

Podstawową tekstylną strukturą wieloosiową jest tkanina trójosiowa o splecie bazowym. Pierwsze prace nad uzyskaniem tkaniny trójosiowej były prowadzone już w pierwszej połowie XX wieku, gdzie strukturę tkaniny wytwarzano sposobem ręcznym. Niezwykle trudnym zadaniem było opracowanie maszyny do wytwarzania tkanin wieloosiowych, a w szczególności z wysoko wytrzymałych włókien, dla celów ochron balistycznych. Opracowano szereg prototypów maszyn, jednak dopiero w ostatnich latach firma Triaxial Structures, Inc. opracowała krosno do wytwarzania tkanin trójosiowych o splecie bazowym na skalę przemysłową z włókien wysoko wytrzymałych Kevlar 29 i Vectran. Dostępność tych tkanin spowodowała podjęcie prac badawczych w ramach niniejszej pracy doktorskiej nad oceną ich efektywności balistycznej w kontekście potencjalnych fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku w ciało człowieka. Wykazano różnice jakie występują w efektywności balistycznej i skali traury balistycznej pomiędzy pakietami wykonanymi z tkanin dwuosiowych i z tkanin trójosiowych. Oba typy tkanin były wykonane z tej samej przędzy para-aramidowej Kevlar 29 i miały taką samą masę powierzchniową.

2. CEL I TEZA PRACY

Cel pracy:

Numeryczna i eksperymentalna analiza efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych osłon złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych oraz ocena skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku.

Głównym celem pracy było udowodnienie tezy:

Poprzez zastosowanie w wielowarstwowych osłonach balistycznych tkanin wielosiowych zamiast tradycyjnie stosowanych tkanin dwuosioowych istnieje możliwość minimalizacji fizjologicznych skutków udaru balistycznego przy zachowaniu porównywalnej masy osłony.

Zakres pracy dotyczył analizy numerycznej i eksperymentalnej płaskich tekstyliów pod kątem ich zastosowania na wielowarstwowe miękkie osłony balistyczne. Plan pracy obejmował realizację założonego celu badawczego poprzez:

1. numeryczne modelowanie wielowarstwowych osłon balistycznych złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych,
2. numeryczną i eksperymentalną ocenę efektywności balistycznej wielowarstwowych osłon balistycznych złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych,
3. eksperymentalną ocenę traumatyzacji balistycznej podczas uderzenia pocisku w wielowarstwową osłonę balistyczną złożoną z tkanin dwuosioowych i trójosiowych z użyciem znormalizowanych podłoży balistycznych: plastelina Roma No. 1 i żel balistyczny *Clear Ballistic*,
4. opracowanie modelu numerycznego i fizycznego korpusu ciała człowieka,
5. modelowanie pakietu balistycznego z szablonami o wielkości korpusu ciała człowieka,
6. numeryczną i eksperymentalną ocenę skutków udaru balistycznego podczas uderzenia pocisku w wielowarstwową osłonę balistyczną złożoną z tkanin dwuosioowych i trójosiowych chroniącą korpus ciała człowieka.

3. PRZEGLĄD LITERATURY

3.1. Modelowanie analityczne i numeryczne uderzenia pocisku w pakiet balistyczny

Pierwsze znaczące prace dotyczące modelowania analitycznego uderzenia pocisku w tekstylny pakiet balistyczny były realizowane przez Wilde i in. (1973). Przedstawiono model fizyczny uderzenia pocisku w pakiet balistyczny, przyjmując trzy podstawowe założenia: absorpcja energii kinetycznej pocisku przez pakiet balistyczny następuje w wyniku odkształcania nitek, a przemieszczanie pocisku w pakiecie balistycznym powoduje deformacje pakietu, który określa się obszarem stożka odkształcania; odkształcenie tkaniny obejmuje tylko nitki wątku i osnowy kontaktujące się z czołem pocisku, natomiast energia kinetyczna pocisku przejmowana jest przez nitki kontaktujące się z czołem pocisku. W procesie modelowania uwzględniono parametry nitki, takie jak masa, wytrzymałość na zerwanie oraz parametry pocisku: masa i prędkości uderzenia. Opracowany model generował całkowitą energię absorbowaną przez pakiet balistyczny dla różnych prędkości uderzenia pocisku. Otrzymane rezultaty nie były weryfikowane eksperymentalnie. Badania pokazały, że stożek odkształcania ma kształt ostrosłupa prawidłowego czworokątnego. Natomiast prędkość czoła fali poprzecznej wykazuje zmienne wartości w zależności od fazy penetracji. W przedstawionym modelu nie uwzględniono przeplotów nitek oraz transmisji energii odkształcania do innych nitek tkaniny.

Wieloletnie badania związane z uderzeniem pocisku w tkaninę prowadzone przez Roylance i Wang (1979, 1980) pozwoliły na zaproponowanie korekcji prędkości propagacji fali naprężeń w tkaninie jako ułamkowej części prędkości propagacji fali naprężeń w nitce (c) zastosowanej do jej wykonania. Na podstawie analizy przekroju poprzecznego tkaniny wzdłuż nitek jednego z układów wątku lub osnowy stwierdzono, że gęstość ośrodka rozchodzenia się fali jest podwajana. Wnioskowano, że jest to spowodowane nałożeniem się na nitki układu osnowy drugiego układu nitek, czyli nitek wątku.

Navarro i in. (1994) modelowali uderzenie pocisku w pakiet balistyczny wykonany z tkaniny. Przyjęto założenie, że granica niezerowej wartości deformacji poprzecznej ma kształt koła. Obliczano odkształcenia i siły rozciągające dla nitek zlokalizowanych w stożku odkształcania i dla tych, które kontaktują się z czołem pocisku. W modelu uwzględniono tarcie pomiędzy nitkami wątku i osnowy. Pakiet wykonano z 27 warstw tkaniny o nazwie handlowej Kevlar HT i masie powierzchniowej 190 g/m^2 . Przyjęto dynamiczny współczynnik tarcia 0,25 pomiędzy nitkami wątku i osnowy, natomiast prędkość pocisku wynosiła 400 m/s . Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że maksymalna deformacja poprzeczna pakietu balistycznego w punkcie uderzenia pocisku jest mniejsza niż 25 mm . Z kolei promień obszaru niezerowej deformacji zmienia się

w czasie do wartości ok. 40 mm. Podczas badań eksperymentalnych wykonanych dla pakietu balistycznego na podłożu plastelinowym, maksymalna głębokość odcisku wynosiła 35 mm, natomiast promień strefy z niezerowym wgnieceniem zawierał się w granicach 23 do 38 mm.

Badania numeryczne uderzenia pocisku w pojedynczą warstwę tkaniny aramidowej Kevlar KM2 w programie LS-Dyna analizował Duan i in. (2005a, 2005b). Geometryczny model tkaniny opracowano jako strukturę przeplataną na podstawie rzeczywistych parametrów tkaniny. W kolejnym etapie przeprowadzono dyskretyzację modelu geometrycznego warstwy tkaniny. Modelowano zagadnienie kontaktu pomiędzy pociskiem a tkaniną poprzez wprowadzenie współczynnika tarcia oraz kontaktu pomiędzy nitkami wątku i osnowy. Pocisk o masie 0,627 g uderzał z prędkością początkową równą 245 m/s. Na podstawie analizy wyników badań numerycznych wyciągnięto wnioski, iż zagadnienie kontaktu jest istotne w ocenie efektywności balistycznej tkaniny. W przypadku pominięcia współczynników tarcia, zarówno prędkość resztkowa pocisku, jak i czas penetracji są znacznie mniejsze w stosunku do wielkości obliczonych z uwzględnieniem tarcia pomiędzy nitkami.

Dalsze badania realizowane przez zespół naukowców Duan i in. (2005c) dotyczyły wpływu zamocowania krawędzi tkaniny oraz współczynnika tarcia statycznego (μ_s) i dynamicznego (μ_d) pomiędzy nitkami wątku i osnowy i pociskiem a strukturą warstwy na absorpcję energii kinetycznej pocisku przez tkaninę. Model geometryczny warstwy opracowano jako strukturę przeplataną na podstawie rzeczywistych parametrów tkaniny Kevlar. W dalszym etapie model geometryczny warstwy poddano procesowi dyskretyzacji i na podstawie literatury przyjęto dla niej model materiałowy *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC. Pojedyncza warstwa tkaniny posiadała wymiar 32,7 mm x 32,7 mm. W badaniach numerycznych zastosowano trzy warianty warunków brzegowych dla krawędzi tkaniny: zamocowanie jej czterech krawędzi; zamocowanie jej dwóch przeciwległych krawędzi; brak zamocowania krawędzi. W celu określenia wpływu współczynnika tarcia pomiędzy nitkami wątku i osnowy na absorpcję energii pocisku przez tkaninę przyjęto dwa warianty: $\mu_s = \mu_d = 0$ i $\mu_s = \mu_d = 0,5$. Symulacje komputerowe przeprowadzono w programie LS-Dyna. Zastosowano pocisk w postaci kuli o średnicy 8 mm i masie 2,091 g, który uderzał centralnie w warstwę tkaniny. Dla pocisku przyjęto prędkość uderzenia równą 800 m/s oraz zastosowano dla niego model materiałowy *MAT_RIGID. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że warstwa tekstylna posiadająca współczynniki tarcia $\mu_s = \mu_d = 0,5$ pomiędzy nitkami wątku i osnowy, absorbuje więcej energii kinetycznej pocisku niż dla wartości zerowej współczynników tarcia. W kolejnym etapie analizowano wpływ zamocowania krawędzi tkaniny na sposób odkształcenia warstwy. Wyniki badań numerycznych dla wariantów zamocowania czterech oraz dwóch przeciwległych krawędzi tkaniny pozwoliły wyciągnąć wniosek, iż energia absorbowana przez warstwę tkaniny jest większa

niż przy wariacie pozabawionym zamocowania krawędzi tkaniny. Stwierdzono, że zamocowanie krawędzi tkaniny ma istotny wpływ na sposób odkształcenia warstwy.

Duan i in. (2006), kontynuując swoje badania numeryczne, analizowali wpływ prędkości uderzenia pocisku i zamocowania krawędzi tkaniny na absorpcję energii kinetycznej pocisku przez warstwę. W badaniach numerycznych zastosowano warstwę o wymiarach, parametrach materiałowych i warunkach brzegowych jak podczas badań Duan i in. (2005c). W badaniach numerycznych zastosowano pocisk o średnicy 8 mm i masie 2,091 g uderzający centralnie w badaną warstwę z prędkościami 200 m/s i 400 m/s. Dla pocisku przyjęto model materiałowy *MAT_RIGID. Dla wartości współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego pomiędzy nitkami osnowy i wątku oraz pociskiem a warstwą przyjęto jednakową wartość $\mu_s = \mu_d = 0,3$. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że ilość energii kinetycznej pocisku absorbowanej przez tkaninę zależy od prędkości uderzenia penetratora. Wyniki badań numerycznych pozwoliły wyciągnąć wniosek, że energia absorbowana przez warstwę jest zależna od zamocowania krawędzi tkaniny dla prędkości uderzenia pocisku równej 200 m/s. Dla prędkości uderzenia penetratora wynoszącej 400 m/s zauważono, że rodzaj przyjętych warunków brzegowych nie wpływa na ilość absorpcji energii kinetycznej pocisku przez warstwę tkaniny.

Modelowanie procesu uderzenia pocisku w tekstylną osłonę z uwzględnieniem modelu geometrycznego nitek wątku i osnowy umożliwia poznanie złożonych zjawisk zachodzących pomiędzy pociskiem a tkaniną. Jednakże tego typu modelowanie wymaga zasobów komputerowych o dużej mocy obliczeniowej. Z tego też względu często stosowano uproszczenia w modelu geometrycznym tkaniny w celu przyspieszenia obliczeń. Tego typu podejście przedstawił Nilakantan i in. (2008, 2010a, 2010b). Badano efektywność balistyczną warstwy polegającą na wyznaczeniu prędkości resztkowej pocisku oraz sposobu deformacji tkaniny przeprowadzono dla trzech prędkości uderzenia pocisku: 40 m/s, 100 m/s i 200 m/s. Dla warstwy tkaniny zaproponowano trzy obszary. W badaniach numerycznych model nitki dla warstwy przeplatanej wykonano na podstawie szczegółowej analizy wymiarów okresu, szerokości i wysokości nitek w przekroju poprzecznym tkaniny Kevlar KM2. Dla geometrii nitki przyjęto następujące wymiary: okres był równy 0,747 mm, szerokość wynosiła 0,536 mm natomiast wysokość była równa 0,115 mm. Badania numeryczne przeprowadzono dla pojedynczej warstwy tkaniny o wymiarze 101,6 mm x 50,8 mm w pięciu modyfikacjach obszarów. Dla tkaniny zastosowano model materiałowy *MAT_ORTHOTROPIC_ELASTIC. W badaniach zastosowano warunek brzegowy polegający na zamocowaniu czterech krawędzi tkaniny. Zdefiniowano kontakt pomiędzy nitkami wątku i osnowy oraz pomiędzy pociskiem a warstwą przyjmując typ kontaktu AUTOMATIC_SINGLE_SURFACE. W celu uzyskania połączenia struktury

przeplatanej elementów skończonych 3D ze strukturą przeplataną elementów skończonych 2D zastosowano opcję `CONSTRAINED_SHELL_TO_SOLID`. Natomiast połączenie struktury przeplatanej elementów skończonych 2D z obszarem bez przepływu będącym powłoką 2D połączono za pomocą ustawienia `CONSTRAINED_TIE_BREAK`. Numeryczne analizy przeprowadzono w programie LS-Dyna, gdzie zastosowano pocisk w postaci stalowej kuli o średnicy 5,55 mm i masie 0,63 g uderzający centralnie w warstwę. Dla pocisku przyjęto model materiałowy `*MAT_RIGID`. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla prędkości uderzenia pocisku równej 40 m/s sposób rozchodzenia deformacji dla czterech wariantów modyfikacji obszaru warstw tkaniny jest podobny jak dla warstwy wykonanej wyłącznie ze struktury przeplatanej z elementami skończonymi 3D. Dla prędkości uderzenia pocisku równej 100 m/s i 200 m/s zauważono, że po czasie 50 μ s dla warstwy o układzie krzyżowym sposób deformacji odbiega od deformacji pierwszej warstwy i ulega zafalowaniu. W przypadku układu lokalnego oraz układu pasmowego obszar i sposób deformacji warstwy również odbiega od deformacji warstwy wykonanej wyłącznie ze struktury przeplatanej z elementami skończonymi 3D. Zauważono, że dla badanych warstwy prędkość resztkowa pocisku była na podobnym poziomie dla prędkości uderzenia 40 m/s, 100 m/s, jak i 200 m/s. Stwierdzono, że proces obliczeń numerycznych został najszybciej wykonany dla układu krzyżowego oraz lokalnego.

3.2. Tekstylne struktury wieloosiowe

Tekstylne struktury wieloosiowe powstają w wyniku przeplatania co najmniej trzech układów nitek. Tego typu strukturę wieloosiową określa się jako tkaninę o splocie bazowym trójosiowym. Tkanina trójosiowa charakteryzuje się dwoma układami nitek osnowy, gdzie jeden układ nitek osnowy znajduje się zawsze nad drugim układem nitek osnowy. Układ nitek osnowy skierowany jest do układu nitek wątku pod kątem $+60^\circ$. Natomiast układ nitek osnowy tworzy z układem nitek wątku kąt -60° .

Pierwsze zgłoszenie patentowe nr 1368215 dotyczące tkaniny trójosiowej ukazało się w roku 1921 autorstwa Franka H. Stewarta. Strukturę wieloosiową wytwarzano wówczas sposobem ręcznym i posiadała ona ograniczoną szerokość. Tkanina składała się z 9 układów nitek osnowy skierowanych pod kątem $+60^\circ$ oraz 9 układów nitek osnowy skierowanych pod kątem -60° .

Badania doświadczalne efektywności balistycznej pakietów złożonych z tkanin trójosiowych i dwuosiowych wykonanych z nitek poliamidowych Nylon 66 realizowali Harle i in. (1981). Hipotetycznie zakładano, że tkaniny trójosiowe powinny posiadać lepsze właściwości balistyczne niż tkaniny dwuosiowe. Głównie miało to wynikać z większej izotropii tkaniny trójosiowej, która prowadziłaby do bardziej równomiernego rozłożenia naprężeń wokół punktu uderzenia pocisku. Z drugiej strony hipotetycznie zakładano, że odporność balistyczna pakietów złożonych z tkanin trójosiowych ze względu na sześciokątne otwory w strukturze tkaniny będzie mniejsza niż dla pakietów z tkanin dwuosiowych. W badaniach zastosowano stalowy pocisk w kształcie walca

o masie 1,004 g, średnicy 5,5 mm oraz długości 5,5 mm. Ocenę efektywności balistycznej pakietów złożonych z tkanin dwuosiowych i trójosiowych przeprowadzono poprzez wyznaczenie minimalnej liczby warstw zapewniającej nieprzebiecie pakietu. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że minimalna liczba warstw zapewniająca nieprzebiecie pakietu z tkanin dwuosiowych jest mniejsza niż dla pakietu z tkanin trójosiowych. Wnioskowano, że jest to wynikiem wpływu sześciokątnych otworów w strukturze tkaniny, które nadają jej znaczną ażurowość.

Struktury wieloosiowe stały się inspiracją do opracowania prototypu maszyny do ich wytwarzania przez Lima i in. (2009). Zaprojektowany i zbudowany prototyp maszyny pozwolił na wytwarzanie tkanin składających się z czterech układów nitek: układu osnowy, układu wątku, układu nitek skośnych pod kątem $+45^\circ$ do układu nitek wątku oraz układu nitek skośnych pod kątem -45° do układu nitek wątku. W artykule nie podano informacji o szerokości tkaniny. Jednakże podkreślono, że prototyp maszyny wymaga udoskonalień przede wszystkim pod względem zwiększenia szerokości tkaniny tak, aby była ona na poziomie 1000 mm. Przeprowadzono badania maksymalnej siły zrywającej dla trzech tkanin czterosiowych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że największą wytrzymałość posiada tkanina, w której układ nitek wątku wykonano z przędzy z włókien węglowych (Carbon). Najmniejszą wytrzymałością charakteryzowała się tkanina, w której układ nitek wątku wykonano z PES. Zauważono, że tkanina ta posiadała największe wydłużenie zrywające.

3.3. Fizjologiczne skutki udaru balistycznego

Efektywność balistyczna włókien oraz miękkich pakietów formowanych z płaskich wyrobów włókienniczych ma istotny wpływ na skalę udaru balistycznego powstającego podczas niepenetrującego uderzenia pocisku (ang. BABT – Behind Armor Blunt Trauma). Z generowaniem udaru balistycznego związane jest ryzyko wystąpienia zewnętrznych i wewnętrznych obrażeń w ciele człowieka powodujących zaburzenia w funkcjonowaniu organizmu, które w zależności od skali mogą być przyczyną śmierci lub ciężkiego kalectwa.

Carroll i in. (1978) przedstawili opis obrażeń balistycznych powstałych w wyniku niepenetrującego uderzenia pocisku w kamizelkę kuloodporną, chroniącą ciało oficera policji, gdzie pakiet balistyczny składał się z tkaniny Kevlar 29. Na podstawie dokumentacji medycznej omówiono zewnętrzne i wewnętrzne skutki udaru balistycznego 33-letniego policjanta, który został postrzelony dwukrotnie pociskiem kal. 0,38 cal w klatkę piersiową. Pierwszy strzał został oddany w prawą część klatki piersiowej, natomiast drugi w środkową część klatki piersiowej. Na powierzchni ciała policjanta zdiagnozowano dwie krwawiące rany. Rana po pierwszym uderzeniu niepenetrującym posiadała

wymiar 3 cm x 4 cm. Natomiast druga rana była bardziej rozległa i posiadała wymiar 6 cm x 6 cm. Pacjent został przebadany pod kątem obrażeń wewnętrznych, które pozwoliły stwierdzić wystąpienie zaburzeń w rytmie serca. Zdiagnozowano zmiany w EKG serca i pojawienie się **enzymów komórkowych**, tj.: **troponiny, wskazujących** na możliwość wystąpienia zawału mięśnia sercowego. Omówiono również przypadek 28-letniego oficera policji postrzelonego jednokrotnie w klatkę piersiową pociskiem kal. 0,22 cal. Niepenetrujące uderzenie pocisku w kamizelkę kuloodporną chroniącą klatkę piersiową policjanta skutkowało wystąpieniem rany po lewej stronie. Wielkość podbiegnięcia krwawego na powierzchni ciała posiadała wymiar 2 cm x 3 cm. Podczas hospitalizacji stwierdzono niewielkie zmiany krwotoczne oraz obrzęk w lewym płucu. Omówione przypadki urazów balistycznych na skutek postrzelenia niepenetrującego, pozwoliły zdefiniować zjawisko traumy balistycznej jako jednostki klinicznej. Zidentyfikowano traumę balistyczną jako możliwy problem, którego skala zależy przede wszystkim od anatomicznego trafienia pocisku.

Modelowanie numeryczne pod kątem opracowania geometrii modeli organów ciała człowieka stanowi wyzwanie, które wymaga poznania złożoności anatomii ciała ludzkiego oraz aktualnego stanu wiedzy na ten temat. Doniesienia z literatury światowej pokazują różnorodność podejść do modelowania ciała człowieka. Oryginalną metodykę opracowania modelu numerycznego w układzie: „pocisk – osłona balistyczna – klatka piersiowa” za pomocą metody elementów skończonych przedstawił Raftenberg (2003, 2004). Model klatki piersiowej ciała człowieka przyjął na podstawie oryginalnego modelu ciała człowieka zaproponowanego przez Wanga (1995), uwzględniając takie organy jak: serce, płuca, wątroba, główne arterie krwionośne, kręgosłup, kości klatki piersiowej, mięśnie, skóra i tkanka tłuszczowa. Głównym celem badań było określenie deformacji i rozkładu naprężeń w klatce piersiowej oraz ocena fizjologicznych skutków udaru balistycznego. W badaniach zastosowano różne typy pocisków: Parabellum 9 mm, M822, M80. Oprócz badania wpływu typu pocisku na skalę traumy balistycznej, określano również wpływ jego prędkości na deformacje oraz naprężenia pojawiające się w organach klatki piersiowej przy różnej liczbie warstw pakietu balistycznego. Symulacje były prowadzone metodą elementów skończonych w programie LS-Dyna. Dla poszczególnych modeli przyjęto odpowiednie parametry materiałowe. Dla modelu bariery przeciwuderzeniowej przyjęto parametry rzeczywistej tkaniny wykonanej z przędzy para-aramidowej Kevlar KM2. Oceniając zagrożenia powstałe na skutek niepenetrującego uderzenia stwierdzono, że największe zagrożenie utraty życia występuje w momencie oddziaływania udaru na serce, płuca oraz wątrobę. W przypadku tkanki tłuszczowej, mięśni i skóry zauważono, że silnie tłumią one falę uderzeniową.

Podobne badania były prowadzone przez Robertsa i in. (2005, 2007). Celem badań było opracowanie modelu numerycznego i eksperymentalnego torsu ciała

człowieka oraz przeprowadzenie oceny obrażeń na skutek niepenetrującego uderzenia pociskiem Parabellum 9 mm przy różnych prędkościach uderzenia: 150 m/s, 200 m/s, 270 m/s i 360 m/s. W modelu numerycznym ciała człowieka uwzględniono takie organy jak: serce, płuca, żołądek, mięśnie wraz ze skórą, układ kostny składający się z kręgosłupa oraz mostka połączonego chrząstką z żebrami. Analizowano ciśnienie oraz jego rozkład w organach podczas uderzenia pocisku w mostek na linii położenia serca i w jamę brzuszną na linii położenia wątroby. Do badań numerycznych zastosowano moduł obliczeniowy w postaci programu LS-Dyna. W badaniach numerycznych dla modeli organów ciała człowieka przyjęto parametry na podstawie danych z literatury. Wyniki badań numerycznych weryfikowano z wynikami uzyskanymi podczas ostrzału fizycznego modelu ciała człowieka w laboratorium badań balistycznych. Fizyczny model ciała człowieka opracowano w oparciu o technologię druku 3D za pomocą drukarki firmy Stratasys Inc. Modele 3D serca, płuc, mostka wraz z chrząstkami układu kostnego oraz wątroby wykonano technologią druku z termoplastycznego tworzywa sztucznego, których skład chemiczny różnicowano w zależności od danego narządu. W fizycznym modelu torsu ciała człowieka zamocowano czujniki ciśnienia. W celu przeprowadzenia oceny traumy balistycznej kompletny model ciała człowieka poddano ostrzałowi. W pierwszej kolejności dokonano ostrzału w mostek na linii położenia serca, a następnie w jamę brzuszną na linii położenia wątroby. Przed ostrzałem na powierzchnię modelu fizycznego nałożono kamizelkę kuloodporną wykonaną z przędzy para-aramidowej Kevlar, którą zakwalifikowano do II klasy kuloodporności zgodnie z normą NIJ Standard (2001). Kamizelkę poddano ostrzałowi pociskiem Parabellum 9 mm z prędkościami uderzenia jak w badaniach numerycznych. W pierwszej kolejności analizowano ciśnienie w organach podczas badań numerycznych oraz eksperymentalnych po uderzeniu pocisku w klatkę piersiową na linii położenia serca dla prędkości uderzenia pocisku 200 m/s. Na podstawie wyników stwierdzono wzrost ciśnienia w sercu zarówno w badaniach numerycznych, jak i eksperymentalnych. W badaniach numerycznych wartość ciśnienia wynosiła ok. 0,33 MPa, natomiast w badaniach eksperymentalnych wynosiła ok. 0,10 MPa. Zanotowano również wzrost ciśnienia zarówno w badaniach numerycznych, jak i eksperymentalnych w wątrobie, płucach i mostku.

3.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Na podstawie przeglądu literatury sformułowano następujące wnioski:

1. Badania z zastosowaniem modeli analitycznych opisujących zjawisko uderzenia pocisku w pojedynczą nitkę, warstwę tkaniny lub pakiet balistyczny są w dużym stopniu uproszczone i nie obejmują w większości przypadków m.in.: kontaktu pomiędzy nitkami wтку i osnowy, rodzaju

splotu tkaniny, technologicznego zafalowania nitki w strukturze tkaniny oraz kontaktu pomiędzy nitkami w sąsiadujących warstwach tkaniny w pakiecie. Ograniczenia te wpływają na poprawność oszacowania efektywności balistycznej tkanin, tj.: prędkości resztkowej pocisku, ilości absorbowanej energii kinetycznej przez tkaninę oraz rozwój stożka odkształcenia. Głównie w modelowaniu analitycznym uwzględnia się tylko wstępną fazę penetracji pocisku.

2. Badania z zastosowaniem modeli numerycznych pozwalają na uwzględnienie w obliczeniach wielu zjawisk trudnych do realizacji w modelowaniu analitycznym. Poprzez modelowanie numeryczne struktury tkaniny istnieje możliwość uwzględnienia pojedynczych modeli nitki, co pozwala na modelowanie kontaktu oraz zdefiniowanie współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego pomiędzy nitkami w warstwie. Badania numeryczne umożliwiają szczegółowe poznanie złożonego zjawiska zachodzącego podczas uderzenia pocisku w warstwę tkaniny przy zastosowaniu różnych warunków brzegowych oraz prędkości uderzenia pocisku. Wyniki uzyskane za pomocą modeli numerycznych w porównaniu z wynikami z badań eksperymentalnych zapewniają stosunkowo dokładną możliwość oceny efektywności balistycznej pojedynczych tkanin i pakietów tekstylnych.
3. Z doniesień literaturowych wynika, iż nadal występują duże trudności w modelowaniu struktury przeplatanej pakietu balistycznego i badane są warstwy tkaniny o niewielkich rozmiarach. Dotychczasowe badania pokazują, iż największy wymiar warstwy tkaniny posiadającej strukturę przeplataną wynosił 120 mm x 120 mm.
4. Podstawową strukturą wieloosiową jest tkanina o splocie bazowym trójosiowym. Prace nad uzyskaniem tkanin trójosiowych były prowadzone już w pierwszej połowie XX wieku; wówczas wytwarzano je sposobem ręcznym. Obecnie takie tkaniny wykonuje się już komercyjnie za pomocą zautomatyzowanych systemów. Przedstawione w literaturze analizy porównawcze właściwości wytrzymałościowych tkanin trójosiowych i dwuosiowych wskazują, że tkaniny trójosiowe cechują się lepszą wytrzymałością na rozciąganie, ścinanie, rozdarcie, przebicie białą bronią i wypychanie kulą.
5. Udar balistyczny powstający podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w ciało człowieka chronione przez tekstylny pakiet balistyczny w literaturze określono pojęciem *Behind Armor Blunt Trauma (BABT)*. Specyfika obrażeń podczas niepenetrującego uderzenia pocisku może prowadzić do obrażeń zewnętrznych i wewnętrznych zagrażających zdrowiu i życiu człowieka.

4. BADANIA NUMERYCZNE I EKSPERYMENTALNE UDERZENIA POCISKU W WIELOWARSTWOWE OSŁONY BALISTYCZNE Z TKANIN DWUOSIOWYCH I TRÓJOSIOWYCH

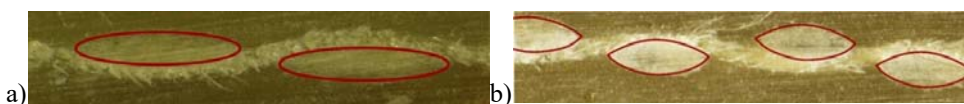
4.1. Założenia wstępne

Badania efektywności balistycznej wielowarstwowych osłon balistycznych z tkanin dwuosiowych i trójosiowych podczas uderzenia pocisku przeprowadzono w oparciu o numeryczne symulacje komputerowe w programie LS-Dyna (LS-Dyna (2007, 2012)) oraz eksperymentalnie w Laboratorium Badań Balistycznych. Przyjęto następujące założenia:

1. Badania będą prowadzone z użyciem pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ, gdyż Laboratorium Badań Balistycznych na Politechnice Łódzkiej wyposażone jest w działo balistyczne z lufą prędkościową umożliwiającą wystrzeliwanie tego typu pocisku.
2. Tkaniny dwuosiowa i trójosiowa będą wykonane z tej samej przędzy i będą mieć porównywalną masę powierzchniową. Różnić się będą jedynie typem splotu.
3. Wymiar pakietu balistycznego w badaniach numerycznych i eksperymentalnych będzie wynosił 20 cm x 20 cm. Taki wymiar zastosowano po wstępnych badaniach własnych i przeglądzie literatury, z których wynika, że średnica podstawy stożka odkształcenia w chwili zatrzymania pocisku mieści się w zakresie od 6 do 12 cm. Zatem na powierzchni 20 cm x 20 cm stożek odkształcenia powinien być całkowicie uwidoczny.
4. W badaniach numerycznych modele geometryczne tkanin opracowane zostaną w oparciu o rzeczywiste wymiary tkaniny dwuosiowej i trójosiowej Kevlar 29.

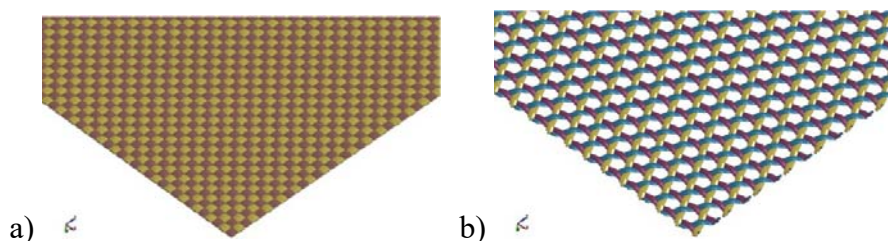
4.1.1. Model geometryczny tkaniny dwuosiowej i trójosiowej

W badaniach numerycznych modele geometryczne tkanin opracowano w oparciu o rzeczywiste wymiary tkaniny dwuosiowej i trójosiowej Kevlar 29. W pierwszym etapie badań określono uśredniony przekrój poprzeczny nitki wątku i osnowy oraz ich okresowy przebieg. Następnie wykonano zdjęcia pod mikroskopem stereoskopowym Olympus SZX-10. Po przeprowadzonej obserwacji mikroskopowej wyznaczono średnie wartości wysokości i szerokości przekroju poprzecznego nitki tworzącej rzeczywistą tkaninę dwuosiową i trójosiową oraz średnie wartości amplitudy i okresu w przebiegu nitek w układzie osnowy i w układzie wątku. Na podstawie wykonanych zdjęć, dla nitek osnowy i wątku tkaniny dwuosiowej przyjęto kształt owalny (rys. 4.1a), natomiast dla nitek osnowy i wątku tkaniny trójosiowej kształt dwuwypukły (rys. 4.1b).



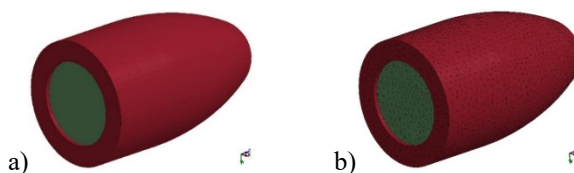
Rys. 4.1. Przekrój poprzeczny: a) tkaniny dwuosiovej z zaznaczonym kształtem owalnym, b) tkaniny trójosiowej z zaznaczonym kształtem dwuwypukłym

Na podstawie wyznaczonych wymiarów przekroju poprzecznego oraz okresowego przebiegu nitki, w kolejnym etapie opracowano warstwę modelu 3D tkanin o wymiarze 20 cm x 20 cm w programie Ansys ICEM CFD. Na rys. 4.2 przedstawiono fragment widoku struktury geometrycznej tkaniny dwuosiovej i trójosiowej.



Rys. 4.2. Widok struktury geometrycznej tkaniny: a) dwuosiovej, b) trójosiowej

Do badań numerycznych opracowano pocisk Parabellum 9 x 19 mm FMJ, który składał się z rdzenia i płaszcza. Model geometryczny pocisku Parabellum 9 x 19 mm opracowano na podstawie danych fabrycznych w oprogramowaniu Ansys DesignModeler (rys. 4.3). W dalszym etapie w programie Ansys ICEM CFD wygenerowano siatki elementów skończonych, przyjmując dla rdzenia i płaszcza o wymiarach krawędzi do 0,5 mm oraz typ siatki Tetra/Solid.



Rys. 4.3. Pocisk Parabellum 9 x 19 mm FMJ: a) model geometryczny pocisku, b) model numeryczny

Pocisk uderzał centralnie w wielowarstwowy układ tekstylny z prędkością początkową 406 m/s, co oznacza, że badania prowadzono w klasie kuloodporności II zgodnie z normą NIJ 0101.06. Wartość prędkości uderzenia pocisku w badaniach numerycznych przyjęto na podstawie wyliczonej średniej wartości prędkości uderzenia pocisków Parabellum 9 x 19 mm zarejestrowanych podczas serii strzałów w tunelu balistycznym.

4.1.2. Metodyka badań numerycznych wielowarstwowych pakietów balistycznych

Badania numeryczne efektywności balistycznej pakietów złożonych z tkanin dwu- i trójosiowych wykonano w programie LS-Dyna z jawnym schematem całkowania po czasie. Solvery tego typu wykorzystywane są do badań szybkozmiennych oraz krótkotrwałych procesów dynamicznych jak wybuchy czy zderzenia obiektów.

Założony plan badawczy, obejmujący symulacje komputerowe w celu określenia efektywności balistycznej wielowarstwowych pakietów tkanin dwuosio- wych i trójosiowych, wymagał bardzo dużych zasobów wydajnościowych sprzętu komputerowego. Opracowane do badań numerycznych modele tkaniny dwuosio- wej oraz trójosiowej były obiektami o bardzo dużej liczbie elementów skończonych. Wstępne badania wykazały, że dla jednej warstwy tkaniny dwuosio- wej lub trójosiowej o wymiarach 20 cm x 20 cm, liczba elementów skończo- nych wynosiła ok. 1 mln. Zwiększając liczbę warstw pakietu balistycznego, automatycznie zwiększała się liczba elementów, co przekładało się jednocześnie na wydłużenie czasu obliczeń numerycznych. Dzięki dysponowaniu sprzętem komputerowym wysokiej klasy, Hewlett-Packard Z800, o dużej mocy obliczenio- wej, istniała możliwość realizacji szerokich badań numerycznych, jednakże proces ten okazał się bardzo czasochłonny. Dla pakietu składającego się z 24 warstw tkanin czas potrzeby do uzyskania wyniku końcowego wynosił ok. jednego miesiąca. W celu przyspieszenia obliczeń, rozważano możliwość realizacji obli- czeń numerycznych za pomocą obliczeń w chmurze (ang. *cloud computing*) na specjalistycznych maszynach wirtualnych o bardzo dużej mocy obliczeniowej. Jednym z rozwiązań było wykorzystanie platformy obliczeniowej www.rescale.com. Planowano przeprowadzenie serii badań numerycznych dla pakietów składa- jących się z 6, 12, 16, 18, 22, 24 i 30 warstw tkanin dwuosioowych oraz trójosio- wych. Jednakże po oszacowaniu koszty realizacji takich badań numerycznych, których skala zależała od liczby wykorzystanych rdzeni procesorów, mieściły się w zakresie od 150 do 250 tys. zł. Ze względu na brak środków finansowych podjęto próbę realizacji badań numerycznych w ograniczonym zakresie na posiadanym w jednostce sprzęcie.

Badania numeryczne przeprowadzono dla pakietów balistycznych skłá- dających się z 6 i 24 warstw tkanin dwuosioowych oraz trójosiowych. Dla wyselekcjonowanych wielowarstwowych pakietów przeprowadzono symulacje uderzenia pocisku Parabellum 9 x 19 mm FMJ. Pocisk uderzał centralnie w pakiet balistyczny z prędkością początkową 406 m/s, co oznacza, że badania prowadzono w klasie kuloodporności II pakietów balistycznych zgodnie z normą NIJ Standard (2008). Wartość prędkości uderzenia pocisku w badaniach numerycznych przyjęto na podstawie wyliczonej średniej wartości prędkości uderzenia pocisków Parabellum 9 x 19 mm firmy Winchester zarejestrowanych

podczas próbnej serii strzałów w Laboratorium Badań Balistycznych. Pocisk ten w dalszej kolejności stosowano w badaniach eksperymentalnych.

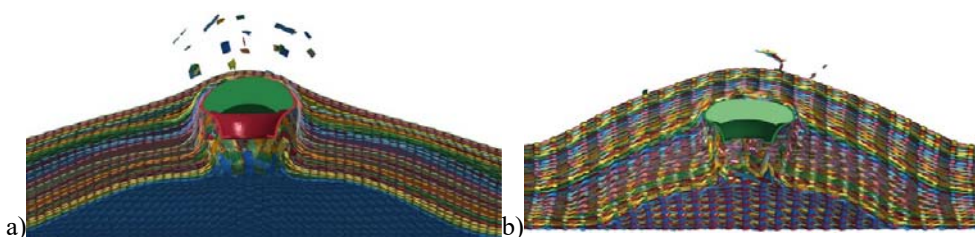
4.1.3. Wyniki badań numerycznych uderzenia pocisku w pakiety balistyczne z tkanin dwuosioowych i trójosiowych

Zgodnie z przyjętą metodyką badań w oprogramowaniu LS-Dyna analizowano numerycznie efektywność balistyczną pakietów tekstylnych dwu- i trójosiowych. W pierwszym etapie analizowano pakiet składający się z 6 warstw tkanin dwuosioowych i trójosiowych. W fazie I uderzenia pocisku w pakiet balistyczny składający się z 6 warstw obserwuje się szybki spadek energii kinetycznej pocisku przede wszystkim z powodu jego grzybkowania, a obszar objęty rozkładem naprężeń jest niewielki. W kolejnej fazie pocisk znacząco deformuje poprzecznie pakiet balistyczny, obserwuje się spadek energii kinetycznej penetratora i zwiększenie obszaru rozkładu naprężeń w pakiecie. W fazie III pocisk przebija pakiet balistyczny i przemieszcza się ze stałą prędkością resztkową.

Na podstawie wyników badań numerycznych zauważono, że proces przestrzelenia pakietu składającego się z 6 warstw tkanin trójosiowych zachodzi szybciej niż dla pakietu składającego się z 6 warstw tkanin dwuosioowych. Energia resztkowa pocisku po przestrzeleniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych wynosiła 598 J, natomiast dla pakietu z tkanin dwuosioowych była równa 571 J. Zdecydowany wpływ na szybszy proces penetracji pakietu przez pocisk jest wynikiem wpływu ażurowej struktury tkaniny trójosiowej.

Analiza wyników badań numerycznych dla pakietów składających się z 6 warstw tkanin dwu- i trójosiowych pod kątem rozkładu naprężeń pokazała znaczący wpływ geometrii splotu na sposób rozchodzenia się naprężeń. Dla pakietu z tkanin dwuosioowych w trzech fazach uderzenia pocisku obserwuje się charakterystyczny dla splotu płóciennego ortogonalny rozkład naprężeń ze stożkiem odkształcenia w kształcie ostrosłupa prawidłowego o podstawie czworokąta foremnego. Dla drugiego analizowanego pakietu widoczny jest rozkład naprężeń w trzech kierunkach układów nitek tkaniny trójosiowej, a stożek odkształcenia przyjmuje kształt ostrosłupa prawidłowego o podstawie sześciokąta foremnego.

W kolejnym etapie analizowano wyniki efektywności balistycznej pakietów składających się z 24 warstw tkanin dwu- i trójosiowych. Dla obu pakietów balistycznych pocisk wyhamował w strukturze tkanin. Poniżej na rys. 4.4 przedstawiono przekrój poprzeczny nieprzestrzelonych badanych pakietów balistycznych.

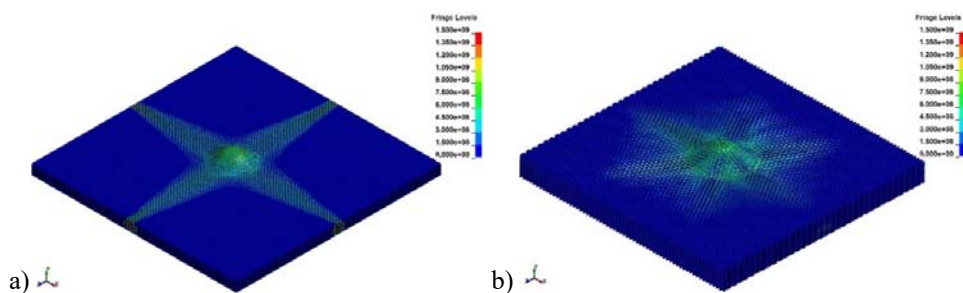


Rys. 4.4. Przekrój poprzeczny pakietu balistycznego składającego się z 24 warstw: a) tkanin dwuosioowych, b) tkanin trójosiowych

W procesie niepenetrującego uderzenia pocisku w pakiet składający się z 24 warstw tkanin dwuosioowych liczba warstw przestrzelonych wynosiła 12. Dla pakietu balistycznego z 24 warstw z tkanin trójosiowych była równa 15. Na większą liczbę warstw przestrzelonych w pakiecie balistycznym z tkanin trójosiowych może wpływać jej ażurowa struktura geometryczna, która nie występuje w tkaninie dwuosiowej i jest całkowicie zabudowana.

Podczas uderzenia pocisku w pakiety balistyczne z tkanin dwu- i trójosiowych obserwuje się różnicę w wysokości i kształcie stożków odkształcenia. Dla pakietu z tkanin dwuosioowych w ostatniej fazie wyhamowania pocisku zauważono proces przemieszczania niewielkiego obszaru tkaniny pozostającej w bezpośrednim kontakcie z pociskiem. Przełożyło się to na uzyskanie większej wysokości i ostrzejszego kształtu zakończenia stożka niż w przypadku pakietu składającego się z 24 warstw tkanin trójosiowych, w którym zauważono mniejszą wysokość i gładki, sferyczny kształt stożka odkształcenia. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych, maksymalna wysokość stożka odkształcenia wyniosła 3,75 cm, natomiast dla pakietu z tkanin trójosiowych była równa 3,00 cm.

W kolejnym etapie analizowano rozkład naprężeń podczas uderzenia pocisku w pakiety składające się z 24 warstw tkanin dwu- i trójosiowych (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Widoki rozkładu naprężeń: a) pakiet balistyczny z tkaniny dwuosioowej, b) pakiet balistyczny z tkaniny trójosiowej

Widoki rozkładu naprężeń przedstawione na rys. 4.5 dla badanych pakietów balistycznych pokazują znaczący wpływ geometrii splotów tkanin na sposób rozchodzenia się naprężeń. Dla struktury wielowarstwowej z tkanin dwuosio- wych zauważono ortogonalny rozkład naprężeń, a stożek odkształcenia ma kształt ostrosłupa prawidłowego o podstawie czworokąta foremego. Dla pakietu składającego się z 24 warstw tkanin trójosiowych występuje rozkład naprężeń w trzech kierunkach, natomiast stożek odkształcenia posiada kształt ostrosłupa prawidłowego o podstawie sześciokąta foremego.

4.2. Modelowanie tekstylnych osłon balistycznych za pomocą struktury zhomogenizowanej

Realizacja badań numerycznych dla pakietów wielowarstwowych z tkanin dwuosio- wych oraz trójosiowych Kevlar 29 pokazała skalę problemu związanego z czasochłonnością wykonywania analiz numerycznych. Dlatego też zdecydowano się na kolejny etap badań numerycznych polegający na zastąpieniu przeplatane- go modelu geometrycznego tkaniny modelem o strukturze zhomogenizo- wanej. Koncepcja tego typu analizy jest znana i była stosowana przez Vinson i Zukas (1975), Simons i in. (2001), Lim i in. (2003), Gomuc (2004), Pereira i Revilock (2004), Barauskas i in. (2005), Ching i Tan (2006), Rajan i in. (2010) oraz Zhu i in. (2014). W tych publikacjach podkreślano, że zastosowanie zhomogenizowanej warstwy w badaniach numerycznych niesie za sobą korzyści wynikające ze skrócenia czasu obliczeń z jednoczesnym zachowaniem adekwat- ności badanego zjawiska z przebiegiem rzeczywistym zdarzenia.

W zaproponowanym rozwiązaniu założono, iż w celu analizy efektywności balistycznej struktur tekstylnych dwuosio- wych oraz trójosiowych zostaną one zamodelowane za pomocą zhomogenizowanych powłok 2D, zróżnicowanych modelami materiałowymi. Poprzez modyfikacje rodzaju modelu materiałowego, można wiarygodnie odwzorować rzeczywisty przebieg zjawiska uderzenia pocisku w tkaninę dwuosio- wą oraz trójosiową Kevlar 29 przy zachowaniu takich samych wartości parametrów wytrzymałościowych. W symulacjach kompute- rowych dla pakietu z tkanin dwuosio- wych zastosowano model materiałowy *MAT_ORTHO_ELASTIC_PLASTIC, natomiast dla tkanin trójosiowych *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Dodatkowo przeprowadzono weryfikację badań numerycznych poprzez przeprowadzenie eksperymentalnych analiz balistycznych dla pakietów z tkanin dwuosio- wych i trójosiowych.

W pierwszym etapie prac badawczych przeprowadzono serię analiz nume- rycznych dla wielowarstwowych pakietów, różniących się rodzajem przyjętego modelu materiałowego. W kolejnym etapie przeprowadzono weryfikację ekspe- rymentalną w Laboratorium Badań Balistycznych dla pakietów balistycznych z tkanin dwuosio- wych i trójosiowych Kevlar 29. W ramach przeprowadzonej weryfikacji eksperymentalnej oceniono poprawność zastosowanych numerycz-

nych modeli materiałowych w zależności od danej struktury tekstylnej. Wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych poddano dwustopniowej ocenie pod kątem analizy prędkości resztkowej pocisku oraz maksymalnej wysokości stożka odkształcenia zgodnie z normą NIJ Standard (2008).

4.2.1. Metodyka badań numerycznych dla modeli zhomogenizowanych

Podobnie jak podczas realizacji badań numerycznych dla wielowarstwowych pakietów balistycznych ze strukturami przeplatany przyjęto dla powłoki 2D metodykę obliczeń numerycznych z jawnym schematem całkowania w programie LS-Dyna. Pierwszy etap badań numerycznych polegał na przygotowaniu modelu geometrycznego powłoki 2D w programie ANSYS ICEM CFD. Dla powłoki 2D przyjęto wymiar 20 cm x 20 cm, który był zgodny z wymiarem poprzednio badanych struktur przeplatanych. W procesie dyskretyzacji powłoki 2D wygenerowano siatkę elementów skończonych o wymiarach krawędzi do 5 mm, zastosowano typ siatki Hexa/Shell. Symulacje komputerowe uderzenia pocisku Parabellum 9 x 19 mm FMJ centralnie w wielowarstwowy pakiet balistyczny składający się z 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 22, 24, 26, 28 oraz 30 warstw przeprowadzono dla prędkości uderzenia 406 m/s. Wyniki badań numerycznych analizowano pod kątem dwóch kryteriów bezpieczeństwa, czyli nieprzestrzelenia pakietu oraz nieprzekroczenia dopuszczalnej granicy maksymalnego stożka odkształcenia pakietu wynoszącej 44 mm wg normy NIJ Standard (2008). Rezultaty badań numerycznych były weryfikowane eksperymentalnie.

4.2.2. Metodyka badań eksperymentalnych wielowarstwowych pakietów balistycznych zamocowanych w stalowych ramach

Wyniki badań numerycznych z użyciem modeli tkanin przeplatanych i zhomogenizowanych weryfikowano eksperymentalnie. W tym celu przeprowadzono badania kuloodporności wielowarstwowych miękkich pakietów tekstylnych w Laboratorium Badań Balistycznych na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów. Szczegółowy opis tunelu balistycznego został przedstawiony w pracy Stempnia (2009). Laboratorium wyposażone jest w działo balistyczne do wystrzeliwania pocisków, system bramek do pomiaru prędkości uderzenia i prędkości resztkowej pocisku oraz kamerę do szybkiej rejestracji obrazów CORDIN 535D. Pierwszym elementem linii balistycznej jest działo balistyczne w postaci Uniwersalnego Przyrządu Balistycznego UPB, który został wykonany przez Fabrykę Broni Łucznik w Radomiu. Działo balistyczne przymocowane jest na stałe do podłoża i nie posiada możliwości regulacji kąta strzału. Ostrzał prowadzony jest przy stałej odległości od próbki i przy zerowym kącie uderzenia pocisku. W skład wyposażenia Uniwersalnego Przyrządu Balistycznego wchodzi lufa balistyczna prędkościowa o średnicy 9 mm.

Kolejnym elementem wyposażenia tunelu balistycznego jest system bramek do pomiaru prędkości uderzenia, jak i prędkości resztkowej pocisku. Dzięki zastosowaniu systemu bramek możliwa jest detekcja położenia pocisku, co wykorzystuje się do wyzwolenia procesu rejestracji w kamerze. Pomiędzy bramką do pomiaru prędkości uderzenia a bramką do pomiaru prędkości resztkowej pocisku znajdują się stalowe ramy, które służą do zamocowania pakietu balistycznego pomiędzy nimi. Proces penetracji pakietu przez pocisk rejestrowany jest przez kamerę, która dzięki zastosowaniu szybko obracającego się lustra może rejestrować obrazy z prędkością do 1 mln klatek na sekundę w rozmiarze 1000 x 1000 pikseli.

Tekstylne pakiety balistyczne z tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29 przed ostrzałem mocowano w uchwycie. Pakiety balistyczne mocowane były pomiędzy dwiema stalowymi ramami. Ramy ściskane były w miejscach prześwietlenia za pomocą zacisków. W wyniku takiego mocowania przemieszczenie pakietu w punkcie mocowania było w przybliżeniu równe zero jak podczas badań numerycznych. W rzeczywistości obserwowano podczas ostrzału niewielkie wysunięcia warstw pakietu z obszaru mocowania, szczególnie nitek kontaktujących się z czołem pocisku. Wymiar powierzchni próbki absorbującej energię pocisku był stały i wynosił 20 cm x 20 cm identycznie jak podczas badań numerycznych. Tekstylne pakiety balistyczne wykonane z tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29 poddano ostrzałowi nabojem typu Parabellum 9 x 19 mm FMJ firmy Winchester.

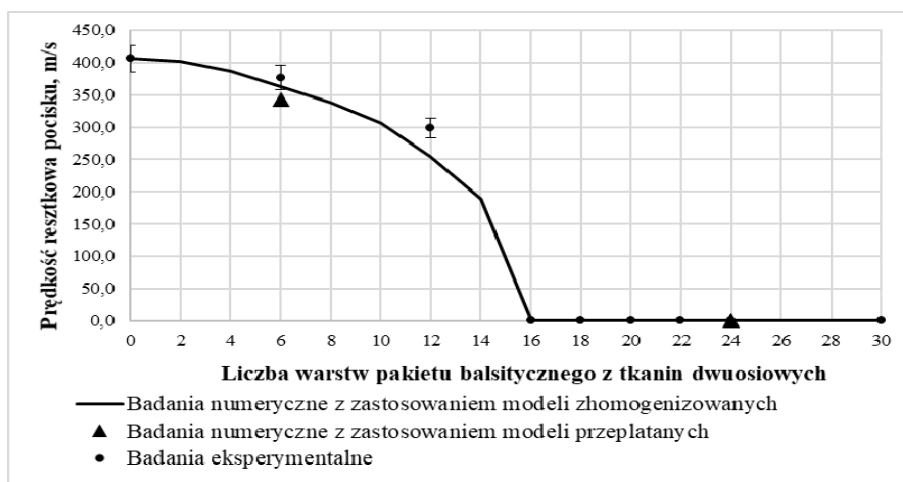
4.2.3. Wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych

Zgodnie z przyjętą metodyką badań numerycznych i eksperymentalnych, pakiety balistyczne złożone z tkanin dwuosioowych i trójosiowych poddano ostrzałowi w warunkach rzeczywistych oraz w warunkach badań numerycznych z zastosowaniem modeli zhomogenizowanych.

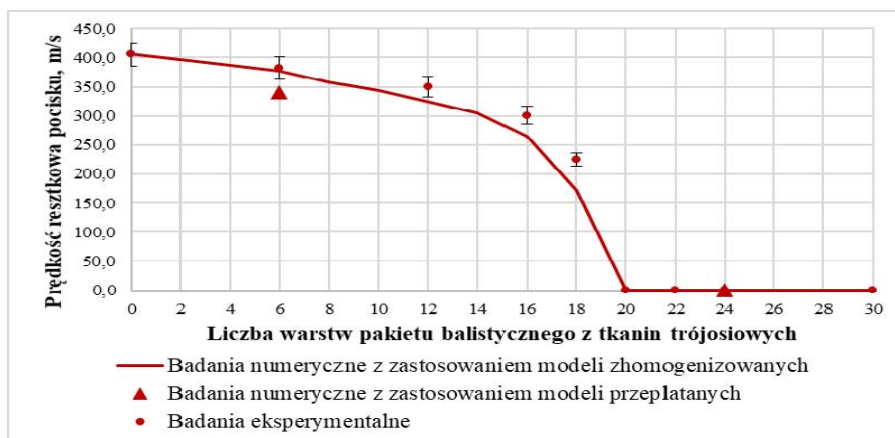
W pierwszej kolejności, dla pakietów złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych analizowano prędkość resztkową pocisku. Na podstawie wyników przedstawionych na rys. 4.6 i rys. 4.7 stwierdzono poprawność modelowania tkanin za pomocą zhomogenizowanych powłok 2D, zróżnicowanych modelami materiałowymi. Stwierdzono, iż zaproponowane modele tkanin dobrze odwzorowują rzeczywiste wartości prędkości resztkowej pocisku.

Następnie oceniano efektywność balistyczną z punktu widzenia minimalnej liczby warstw w pakiecie balistycznym potrzebnych do nieprzestrzelenia przez pocisk. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych składających się z 16 warstw zaobserwowano jego nieprzestrzelenie. W przypadku tkaniny trójosiowej, 20 warstw w pakiecie balistycznym pozwoliło wyhamować pocisk w wielowarstwowej strukturze. Uzyskane rezultaty badań eksperymentalnych i numerycznych dotyczące minimalnej liczby warstw potrzebnej do zatrzymania

pocisku są zbieżne z wynikami badań eksperymentalnych przedstawionych przez Harle i in. (1981). Jest to podstawa do wyciągnięcia wniosku, że nieprzeźrzenie pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych ma miejsce dla mniejszej liczby warstw niż dla pakietu składającego się z tkanin trójosiowych. Wpływ na to ma struktura tkaniny trójosiowej, która posiada sześciokątne otwory nadające jej znaczną ażurowość w porównaniu do tkaniny dwuosioowej.



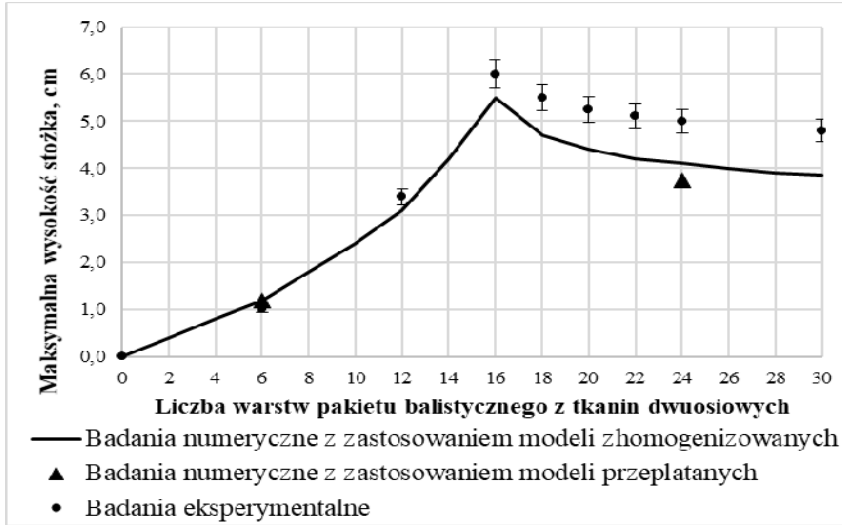
Rys. 4.6. Zależność prędkości resztkowej pocisku w funkcji liczby warstw pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych



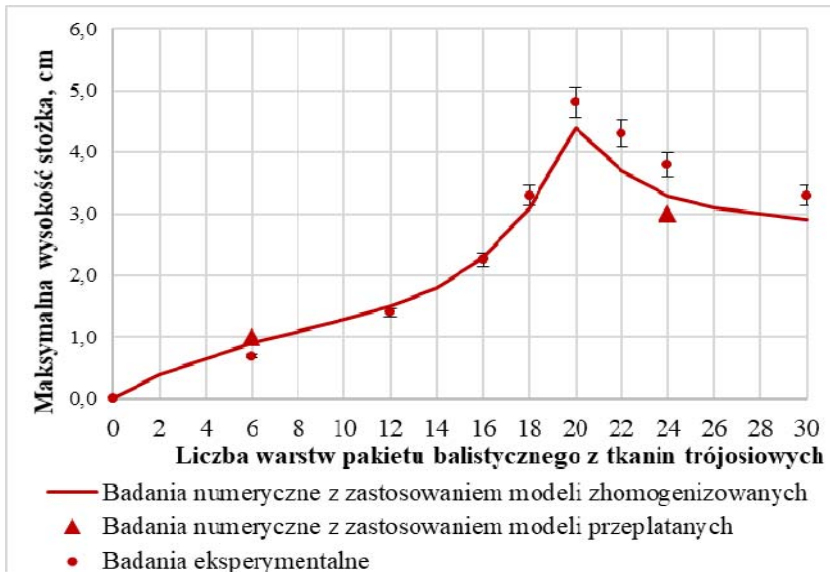
Rys. 4.7. Zależność prędkości resztkowej pocisku w funkcji liczby warstw pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych

W drugiej kolejności analizowano maksymalną wartość stożka odkształcenia w funkcji liczby warstw pakietu balistycznego. Na rys. 4.8 i rys. 4.9 przed-

stawiono wyniki badań wysokości stożka odkształcenia dla pakietów balistycznych złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych poddanych ostrzałowi.



Rys. 4.8. Progresja i regresja maksymalnej wartości stożka w zależności od liczby warstw pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych



Rys. 4.9. Progresja i regresja maksymalnej wartości stożka w zależności od liczby warstw pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych

Otrzymane wyniki maksymalnego stożka odtrażenia (rys. 4.8 i 4.9) w badaniach numerycznych dla pakietów balistycznych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych wykazują występowanie dwóch charakterystycznych tendencji: progresji oraz regresji jak w przypadku badań eksperymentalnych. Zastosowanie większej liczby warstw pakietu balistycznego powoduje progresję stożka odkształcenia. Krzywa progresji zatrzymuje się dla takiej samej liczby warstw pakietu przy analizach numerycznych i eksperymentalnych zarówno dla tkaniny dwuosioowej, jak i trójosiowej. Przy regresji wysokości maksymalnego stożka odkształcenia podczas niepenetrującego ostrzału w badaniach numerycznych osiągnięto mniejsze wartości niż w badaniach eksperymentalnych. Wynikało to przede wszystkim z wysuwania się zakleszczonych warstw pakietu balistycznego z ram podczas realizacji badań eksperymentalnych, co nie występowało w analizach numerycznych, gdzie krawędzie każdej warstwy badanego pakietu były zakleszczone za pomocą funkcji BAUNDARY SPC-SET. W konsekwencji wpłynęło to na osiągnięcie mniejszych wartości maksymalnego stożka w badaniach numerycznych niż w przypadku badań eksperymentalnych.

W celu oceny kształtu stożka odkształcenia podczas ostrzału pakietów złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych w Laboratorium Badań Balistycznych rejestrowano obrazy za pomocą kamery CORDIN 535D. Poniżej w tabelach 4.1 i 4.2 przedstawiono wybrane obrazy dla pakietów składających się z 30 warstw tkanin dwu- i trójosiowych z widocznym rozkładem naprężeń w badaniach numerycznych.

Tabela 4.1. Obrazy stożka odkształcenia i rozkład naprężeń podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny składający się z 30 warstw tkanin dwuosioowych w badaniach numerycznych i eksperymentalnych

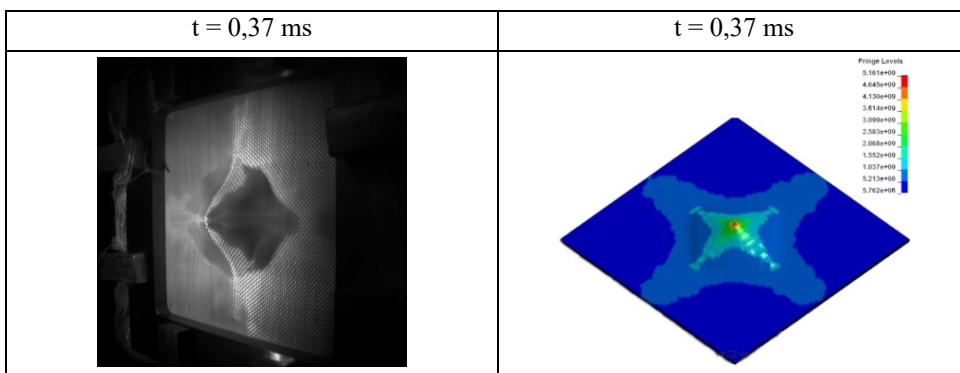
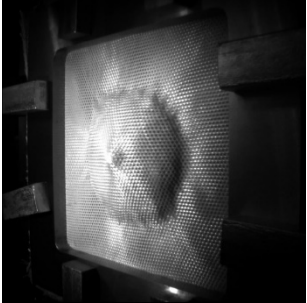
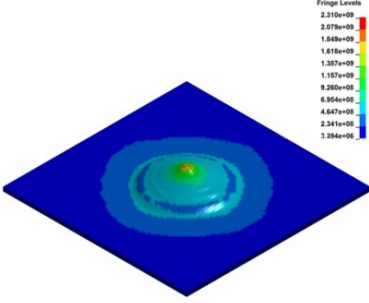


Tabela 4.2. Obrazy stożka odkształcenia i rozkład naprężeń podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny składający się z 30 warstw tkanin trójosiowych w badaniach numerycznych i eksperymentalnych

BADANIA EKSPERYMENTALNE	BADANIA NUMERYCZNE
t = 0,37 ms	t = 0,37 ms
	

5. EKSPERYMENTALNA ANALIZA TRAUMY BALISTYCZNEJ Z UŻYCIEM PODŁOŻA Z PŁASTELINY BALISTYCZNEJ

5.1. Wstęp

Fizjologiczne skutki uderzenia balistycznego minimalizowane są poprzez takie projektowanie pakietów balistycznych, aby głębokość deformacji znormalizowanego podłoża plastelinowego była mniejsza niż 44 mm. Powinno to zapewnić przeżycie osoby noszącej kamizelkę kuloodporną podczas ostrzału, mogą się natomiast pojawić jednostki chorobowe, które uzależnione są od miejsca uderzenia pocisku.

Oceną traumy balistycznej poprzez analizę porównawczą maksymalnej głębokości deformacji w podłożach balistycznych przy zastosowaniu miękkiego pakietu balistycznego zajmowali się Prather i in. (1977). W badaniach zastosowano dwa podłoża balistyczne: blok z żelu balistycznego oraz plastelinę Roma No. 1. Testy balistyczne przeprowadzono przy użyciu pocisków: kal. 0,22 cal, kal. 0,38 cal, 357 Magnum, Parabellum 9 x 19 mm FMJ oraz kal. 0,45 cal. Pakiet balistyczny składał się z 28 warstw tkaniny Kevlar 29. Na podstawie przeprowadzonej analizy porównawczej podłoża balistycznego stwierdzono, że większe wartości deformacji zaobserwowano dla podłoża z żelu balistycznego. Stwierdzono, iż żel balistyczny posiadający zbliżone parametry do tkanek ciała człowieka wiarygodniej odwzorowuje deformacje ciała na skutek niepenetrującego uderzenia niż plastelina balistyczna Roma No. 1. Zakładano teoretycznie,

iż uzyskane wartości maksymalnej deformacji dla bloku z żelu balistycznego mogą prowadzić do licznych obrażeń narządów wewnętrznych, tj.: serca, płuc oraz wątroby.

Testy balistyczne tkanin aramidowych Kevlar 29 o różnych strukturach, ale o tej samej liczności były realizowane przez Chu i Chen (2010). Celem badań było określenie efektywności balistycznej dla poszczególnych tkanin przy zastosowaniu podłoża balistycznego Roma No. 1. Badany pakiet przed ostrzałem umieszczony był pomiędzy dwiema płytami, w których w środku znajdował się otwór o średnicy 10 cm. Tekstylny pakiet mocowano za pomocą zacisków tak, aby nie przemieszczał się w momencie uderzenia pocisku. Do każdego pakietu oddano po jednym strzale w środek próbki, a następnie zmierzono głębokość deformacji plasteliny. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że tkaniny o splocie płóciennym oraz skośnym charakteryzują się lepszą efektywnością balistyczną niż tkaniny o splocie atlasowym.

Kluczowym badaniem pozwalającym ocenić skalę traury balistycznej i fizjologicznych skutków wynikających z uderzenia pocisku w miękkie pakiety balistyczne jest badanie z wykorzystaniem podłoża Roma No. 1. W celu porównania traury balistycznej dla pakietów złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29 przeprowadzono badania eksperymentalne z zastosowaniem bloku z plasteliny balistycznej Roma No. 1.

5.2. Metodyka badań eksperymentalnych z użyciem podłoża z plasteliny balistycznej

Badanie traury balistycznej prowadzono poprzez wyznaczenie maksymalnej głębokości stożka odkształcenia, kształtu stożka odkształcenia i energii rażenia. W pierwszym etapie badań przygotowano podłoże plastelinowe zgodnie z obowiązującą amerykańską normą Ballistic Resistance of Personal Body Armour NIJ Standard (2008). Na podstawie założeń w normie wypełniono skrzynię plasteliną Roma No. 1. Przed ostrzałem blok plasteliny poddano odpowiedniej kalibracji. Powierzchnia bloku była gładka oraz nie posiadała żadnych przestrzeni powietrza. Kalibrację przeprowadzono poprzez zrzucanie kuli w pięciu miejscach na blok plastelinowy. Zgodnie z normą NIJ Standard (2008) średnia arytmetyczna z 5 pomiarów głębokości zrzutu powinna być równa $19 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$. Po przeprowadzonych pomiarach średnia z 5 pomiarów głębokości wynosiła 20,3 mm.

W kolejnym etapie badań podłoża balistycznego określono funkcyjną zależność pomiędzy energią rażenia a objętością deformacji podłoża. W tym celu kulę zrzucano z wysokości: 0,5 m; 1,0 m; 1,5 m; 2,0 m; 2,30 m; 2,90 m oraz 3,30 m na blok plastelinowy i mierzono objętość deformacji plastelinowego podłoża. Energię rażenia podczas zrzutu kuli obliczono ze wzoru na energię

potencjalną jako iloczyn masy kuli, przyspieszenia ziemskiego i wysokości zrzutu. Z kolei w celu pomiaru objętości deformacji podłoża z plasteliny balistycznego przeprowadzono proces skanowania podłoża za pomocą laserowego skanera 3D. Wyniki pomiarów wizualizowano za pomocą oprogramowania Surfer i z dostępnych opcji programu obliczano objętość deformacji. Uzyskane wyniki badań aproksymowano wielomianem drugiego stopnia uzyskanego z następującej zależności:

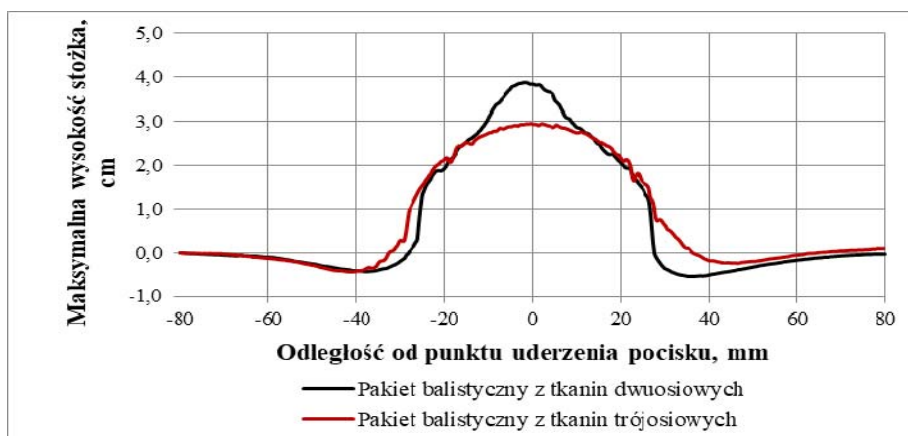
$$V(E_r) = 0,01026 * E_r^2 + 1,10425 * E_r \quad (5.1)$$

Funkcję tę w dalszej kolejności wykorzystano do obliczenia energii rażenia podczas ostrzału pakietów złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29. W tym celu dla każdej z tkanin przygotowano po trzy pakiety balistyczne. Pakiety składały się z 30 warstw badanej tkaniny i posiadały wymiar 60 cm x 60 cm.

Podczas ostrzału w Laboratorium Badań Balistycznych do każdego z miękkich pakietów balistycznych oddano po jednym strzale w środek próbki przy zerowym kącie uderzenia. W momencie ostrzału system do pomiaru prędkości pocisku dokonywał rejestracji prędkości uderzenia pocisku Parabellum 9 x 19 mm FMJ. Po przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych mierzono deformację podłoża z plasteliny balistycznej za pomocą laserowego skanera 3D.

5.3. Wyniki badań eksperymentalnych

W pierwszej kolejności dla pakietów balistycznych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29 analizowano wartość maksymalnej deformacji podłoża balistycznego, która zgodnie z normą nie może przekroczyć granicy bezpieczeństwa wynoszącej 44 mm. Na rys. 5.1 przedstawiono przekrój poprzeczny stożka odkształcenia w miejscu maksymalnej deformacji podłoża dla przykładowych pakietów balistycznych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych. Dla obu pakietów balistycznych drugie kryterium bezpieczeństwa zostało spełnione. Pakiet balistyczny składający się z 30 warstw tkanin dwuosioowych osiągnął wartość maksymalnego stożka odkształcenia równą 3,85 cm. Dla 30 warstw tkanin trójosiowych wartość maksymalnego stożka wynosiła 2,93 cm.



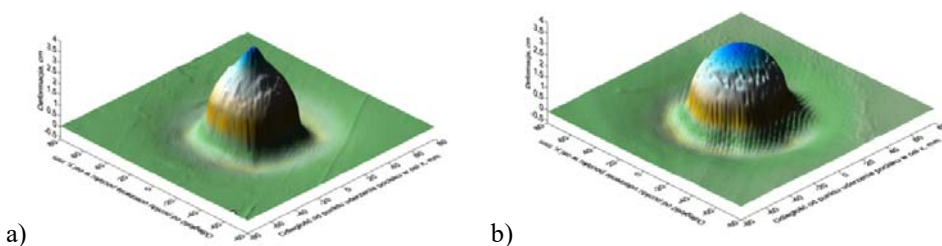
Rys. 5.1. Zależność maksymalnej wysokości stożka w podłożu balistycznym w stosunku do odległości od punktu uderzenia pocisku dla przykładowego pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych i trójosiowych

W celu oceny potencjalnych fizjologicznych skutków uderzenia balistycznego, wyniki badań konsultowano z dr n. med. Anną Smędrą – pracownikiem naukowym Zakładu Medycyny Sądowej Uniwersytetu Medycznego w Łodzi. Na podstawie analizy wyników stożka odkształcenia stwierdzono, że biorąc pod uwagę położenie poszczególnych narządów w ciele ludzkim dla odkształcenia rzędu 3,8 cm może teoretycznie dojść do złamania żebra, uszkodzenia jamy opłucnej z następstwem powstania odmy opłucnej, stłuczenia mięszu płuca czy też powstania wybroczyn lub podbiegnięć krwawych w sercu. W przypadku dojścia do takiego odkształcenia w górnej części klatki piersiowej nastąpiłoby złamanie pierwszych żeber i mogłoby to prowadzić do obrażeń dróg oddechowych i dużych naczyń. W wyniku złamania żebra od X do XII mogłoby dojść do obrażenia przepony, wątroby i śledziony. W przypadku odkształcenia równego 2,9 cm mogłoby dojść do tych samych obrażeń, ale o mniejszym zakresie, istnieje również mniejsze ryzyko pojawienia się podbiegnięć krwawych i wybroczyn w mięśniu serca.

W drugiej kolejności analizowano wielkości otworu na powierzchni bloku balistycznego dla badanych pakietów tekstylnych. W fazie wejściowej deformacji podłoża balistycznego powierzchnia otworu była większa w przypadku ostrzału pakietu z tkanin trójosiowych. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych wielkość otworu początkowego wynosiła 5-6 cm, natomiast dla pakietu z tkanin trójosiowych od 6,5 do 7,0 cm. Na podstawie konsultacji medycznych stwierdzono, że im większa powierzchnia, na którą działa uraz, tym lżejsze powstają obrażenia wewnętrzne. Dlatego też zakres obrażeń wewnętrznych może być mniejszy w przypadku pakietu z tkanin trójosiowych niż dla pakietu z tkanin dwuosioowych. Dla obu pakietów z tkanin balistycznych stwierdzono, że na powierzchni naskórka doszło do znacznego rozerwania tkanki skóry i poja-

wienia się podbiegnięć krwawych w obrębie tkanki mięśniowej spowodowanej pęknięciem naczyń krwionośnych. Śinice i podbiegnięcia krwawe mogą pojawić się również w obrębie płuc i serca. Dr n. med. Anna Smędra podkreśliła, że rozmiar podbiegnięć krwawych zależy nie tylko od siły działającej na ciało i czasu trwania urazu, ale także od struktury oraz unaczynienia uszkodzonych tkanek.

W kolejnym etapie analizowano kształt zdeformowanego podłoża balistycznego (rys. 5.2a i 5.2b). Podczas oględzin bloku z plasteliny balistycznej stwierdzono, że w przypadku pakietu z tkanin dwuosioowych otwór wgłębienia ma kształt zbliżony do ostrosłupa prawidłowego o podstawie czworokąta foremnego. Natomiast dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych deformacja podłoża z plasteliny balistycznej posiada zdecydowanie kształt sferyczny. Zauważono, że w końcowej fazie deformacji pakietu z tkanin dwuosioowych obserwuje się przemieszczenie niewielkiego obszaru tkaniny pozostającej w bezpośrednim kontakcie z pociskiem. Stwierdzono, że takie działanie może prowadzić do złamania żebra, ogniskowego zbierania się krwi w obszarze podbiegnięcia krwawego, np. w płucach lub w mięśniu serca. Jeżeli udar ten zadany byłby bezpośrednio w klatkę piersiową na wysokości serca, to mogłoby to spowodować podbiegnięcia krwawe przedniej ściany serca, komory albo przegrody międzysercowej. Na skutek takich obrażeń może dojść do krwotoku w układzie naczyniowym, skutkując zaburzeniami w rytmie serca. W przypadku konsultacji medycznych podłoża plastelinowego osłoniętego pakietem balistycznym z tkanin trójosiowych stwierdzono, że tego rodzaju zdeformowanie może prowadzić do powstania podbiegnięć krwawych w okolicach płuc czy serca. Jednakże brak wyraźnego spiczastego zakończenia zdeformowanego podłoża niesie za sobą korzyści wynikające ze zminimalizowania ryzyka pojawienia się uszkodzeń jamy opłucnej, stłuczenia mięszu płuca, czy brakiem pojawienia się złamania żebra. Również ryzyko pojawienia się podbiegnięć krwawych i wybroczyn w mięśniu serca jest mniejsze. Medyczna analiza wyników badań pozwoliła na stwierdzenie, że pakiet balistyczny z tkanin trójosiowych może minimalizować skutki udaru balistycznego.



Rys. 5.2. Kształt zdeformowanego podłoża balistycznego dla: a) pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych, b) pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych

W ostatnim etapie analizy wyników badań eksperymentalnych przeprowadzono obliczenie objętości wgłębienia każdego z bloków plastelinowych. Pozwoliło to na obliczenie wartości średniej energii rażenia w zależności od zastosowanego pakietu balistycznego. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosiowych średnia wartość objętości deformacji podłoża wyniosła $15,4 \text{ cm}^3$, natomiast dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych średnia wartość objętości deformacji podłoża wyniosła $21,3 \text{ cm}^3$. Korzystając z zależności (5.1) obliczono wartość energii rażenia. Dla pakietu złożonego z tkanin dwuosiowych wynosiła ona średnio $12,5 \text{ J}$, natomiast dla pakietu złożonego z tkanin trójosiowych $16,8 \text{ J}$. Większa wartość energii rażenia pochłonięta przez blok dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych jest wynikiem przede wszystkim większej powierzchni podstawy stożka odkształcenia i rozłożeniem deformacji na większej powierzchni. Po konsultacjach medycznych stwierdzono jednak, że na rozległość i skalę obrażeń w wyniku urazu balistycznego większy wpływ ma głębokość deformacji niż powierzchnia deformacji.

6. EKSPERYMENTALNA ANALIZA TRAUMY BALISTYCZNEJ Z UŻYCIEM PODŁOŻA Z ŻELU BALISTYCZNEGO

6.1. Wstęp

Kamizelki kuloodporne posiadające miękki tekstylny pakiet balistyczny, oprócz pełnienia podstawowej funkcji zapewnienia bezpieczeństwa, odgrywają bardzo ważną rolę psychologiczną. Potencjalni użytkownicy kamizelek muszą być przekonani o wysokiej skuteczności tekstylnych osłon balistycznych. Dotychczasowe metody określające efektywność miękkich tekstylnych osłon balistycznych tylko częściowo uwzględniają dynamiczne zjawiska zachodzące podczas uderzenia pocisku. W praktyce stosuje się kryterium dopuszczalnego ugięcia osłony podczas badań balistycznych na plastelinie Roma No. 1 oraz nieprzebicie pakietu. Należy jednak pamiętać, że odkształcenie warstwy tekstylnego pakietu balistycznego w kontakcie z ciałem użytkownika może powodować zupełnie inne wartości deformacji, które mogą decydować o zdrowiu i życiu użytkowników tekstylnych osłon balistycznych.

Wykorzystując w badaniach balistycznych blok z żelu balistycznego o homogenicznych właściwościach fizycznych i dużej przezroczystości istnieje możliwość poznania dynamicznego zjawiska deformacji podłoża podczas uderzenia pocisku. Jedne z pierwszych badań z wykorzystaniem żelu balistycznego przeprowadził Dzieman (1960). Zaproponował technikę pomiaru energii kinetycznej zmagazynowanej w strukturze podłoża balistycznego na skutek przemieszczania się pocisku przez blok. Jako podłoża balistycznego użyto żelu o stężeniu 20% w temperaturze 10°C , którego grubość wynosiła zaledwie 15 cm. W badaniach podkreślono fakt braku weryfikacji parametrów żelu w stosunku

do żywych tkanek. W połowie lat 80 zostały opublikowane wyniki badań balistycznych dotyczących analizy toru lotu pocisku oraz interakcji pocisku z blokiem żelu balistycznego przez Facklera i in. (1986). Badania balistyczne przeprowadzono na blokach z żelu o stężeniu 10% w 4°C oraz żywych świniach o masie od 50 do 70 kg. Przeprowadzono analizę porównawczą pod kątem głębokości penetracji pocisku w żelu i w tkance zwierzęcia. Pocisk w kształcie stalowej kuli wystrzeliwano z prędkością ok. 55 m/s. W wyniku przeprowadzonych badań, głębokość deformacji w bloku z żelu balistycznego była na poziomie ok. 3,52 cm, natomiast u zwierząt zaobserwowano deformację o głębokości ok. 3,87 cm.

Badania efektywności balistycznej tkaniny Kevlar oraz próbę oceny traumy balistycznej na skutek niepenetrującego uderzenia pocisku przeprowadzili Montanarelli i in. (1976). Celem badań było wyznaczenie deformacji podłoża balistycznego chronionego przez pakiety balistyczne składające się z: 3, 5, 7, 9, 15 i 23 warstw tkaniny Kevlar 29. W badaniach eksperymentalnych zastosowano podłoże w postaci bloku z żelu balistycznego, który chroniony był przez pakiety tekstylne. Dokonano ostrzału pociskiem kal. 0,38 cal Special z prędkością uderzenia w zakresie od 240 do 250 m/s. Laboratorium balistyczne wyposażone zostało w system do rejestracji prędkości uderzenia pocisku oraz kamerę do rejestracji zjawisk szybkozmiennych. Na podstawie zarejestrowanych zdjęć określono efektywność balistyczną poprzez wyznaczenie maksymalnego stożka odkształcenia dla pakietu nieprzestrzelonego. Dla pakietów składających się z: 3, 5, 7 i 9 warstw tkaniny Kevlar zaobserwowano penetrację pocisku w żel balistyczny, natomiast dla pakietu składającego się z: 15 i 23 warstw pocisk został zatrzymany w strukturze tekstylnej. Maksymalny stożek odkształcenia dla pakietu z 15 warstw przy prędkości uderzenia pocisku 247,9 m/s wynosił 4,08 cm, a dla pakietu z 23 warstw dla prędkości uderzenia pocisku również 248,5 m/s wynosił 3,38 cm. Teoretycznie zakładano, że dla uzyskanych wielkości maksymalnego stożka odkształcenia największe obrażenia wewnętrzne mogłyby wystąpić podczas uderzenia w okolicę jamy brzusznej na linii położenia wątroby, śledziony oraz nerek.

Problematyka badań balistycznych z wykorzystaniem żelu balistycznego, a w szczególności poznanie jego właściwości mechanicznych, była szeroko analizowana przez Datoc (2010). Głównym celem było poznanie uszkodzeń pocisku na skutek uderzenia w blok z żelu. Badania numeryczne przeprowadzono w programie LS-Dyna. Do analizy numerycznej zastosowano pocisk Hornady kal. 0,38 cal. W pierwszym etapie wyznaczono mechaniczne właściwości żelu, gdzie przygotowano: 10% i 20% próbki żelu, które następnie poddano procesowi jednoosiowego ściskania i wyznaczono naprężenie w funkcji czasu. W badaniach numerycznych zastosowano dla żelu balistycznego model materiałowy *MAT_BLATZ-KO_RUBBER. Analiza wyników obliczeń nume-

rycznych wykazała, że pocisk ulega większym uszkodzeniom przy zastosowaniu żelu balistycznego 20% niż przy 10%.

Badania dynamiczne określające oddziaływanie pocisków na ośrodki o niskiej gęstości osłonięte lekkimi osłonami były realizowane przez Koperskiego i in. (2011). Procedura badawcza polegała na ostrzale bloku żelu w różnych konfiguracjach ochronnych, tj.:

- brak osłonięcia – bezpośrednie rażenie,
- tkanina mundurowa,
- stalowa blacha o grubości 1 mm.

Do badań zastosowano różne pociski: pocisk fragmentujący, pocisk 9 mm FMJ, 9 mm JHP, pocisk kal. 5,7 mm. Oceniając skutki oddziaływania pocisku na cel, analizowano: prędkość pocisku podczas penetracji w blok z żelu, prędkość resztkową pocisku, wymiar i kształt kanału w żelu, prędkość narastania kanału, głębokość odkształcenia osłony chroniącej oraz jej prędkość odkształcenia. W podsumowaniu podkreślono, że realizacja badań oddziaływania pocisku na podłoże z żelu nie jest skomplikowana, jednakże proces przygotowania jest czasochłonny i wymaga dużego zaplecza technicznego i nakładów finansowych.

W dotychczas stosowanych znormalizowanych metodach badań nie uwzględnia się oddziaływania dynamicznego osłony na ciało użytkownika. Aktualnie stosuje się jedynie kryterium dopuszczalnego ugięcia osłony na podłożu plastelinowym, które jest niewystarczające by precyzyjnie określić skalę obrażeń wewnętrznych. W wyniku ugięcia osłony z dużą prędkością, przy założeniu nieprzekroczenia dopuszczalnej głębokości odkształcenia, mogą być generowane znacznie większe obciążenia tkanek, które zwiększają skalę traury balistycznej. W związku z tym w pracy podjęto próbę oceny traury balistycznej podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny złożony z 30 warstw tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29 z zastosowaniem żelu balistycznego. Badania balistyczne przeprowadzono z zastosowaniem żelu balistycznego *Clear Ballistics*, który charakteryzuje się niską gęstością, zbliżoną do tkanek miękkich ciała człowieka. Wyniki doświadczalnych badań konsultowano z dr n. med. Anną Smędrą – pracownikiem naukowym Zakładu Medycyny Sądowej Uniwersytetu Medycznego w Łodzi.

6.2. Metodyka badań eksperymentalnych z użyciem podłoża z żelu balistycznego

Przed przystąpieniem do badań balistycznych przygotowano trzy pakiety o wymiarach 35 cm x 35 cm z tkanin dwu- i trójosiowych Kevlar 29. Pakiety składały się z 30 warstw i były połączone ścięciem czółenkowym z zastosowaniem nici 100% Twaron, Nm 50/2. Kolejnym etapem badań eksperymentalnych było przygotowanie bloków z syntetycznego żelu balistycznego *Clear Ballistics*. Polegało to na pokrojeniu zakupionych bloków w mniejsze

kawałki ok. 2 cm x 2 cm x 2 cm, a następnie roztopieniu w temperaturze 132°C. Podczas procesu topienia, ciekły żel mieszano w celu pozbycia się pęcherzyków powietrza. Po roztopieniu odpowiedniej objętości żelu w pojemniku stalowym o wymiarach 35 cm x 32 cm x 20 cm pozostawiono żel do całkowitego wystygnięcia na okres 12 godzin. Po wystygnięciu blok żelu balistycznego wyjmowano z metalowego pojemnika i na jego powierzchnię nakładano pakiet balistyczny, a następnie dokonywano ostrzału na stanowisku badawczym. Dla każdej z tkanin balistycznych przeprowadzono po trzy próby ostrzału pakietu. Deformację żelu podczas uderzenia pocisku rejestrowano kamerą do szybkiej rejestracji CORDIN 535D.

6.3. Wyniki badań eksperymentalnych

Wartość maksymalnej deformacji po czasie 1,2 ms od chwili uderzenia pocisku dla pakietu złożonego z tkanin dwuosioowych wynosiła ok. 5,50 cm, natomiast dla pakietu złożonego z tkanin trójosiowych 4,20 cm. Porównując otrzymane wyniki wartości deformacji żelu balistycznego z określoną w normie NIJ Standard (2008) maksymalną wartością stożka odkształcenia, można stwierdzić, że pakiet balistyczny z tkanin dwuosioowych znacznie przekroczył maksymalną wartość odkształcenia, która wynosi 44 mm. Należy jednak pamiętać, iż w normie zdefiniowane są parametry odkształcenia podłoża dla plasteliny balistycznej, a nie dla żelu balistycznego.

Na podstawie głębokości deformacji żelu balistycznego, posiadającego parametry materiałowe zbliżone do miękkich tkanek ludzkich, można ocenić skalę traury balistycznej. W wyniku powstałych deformacji bloku żelu dla pakietów z tkanin dwuosioowych na poziomie 5,50 cm stwierdzono, że w momencie ostrzału człowieka może to skutkować powstaniem rozerwania naskórka polegającym na miejscowym miażdżeniu i rozciąganiu. Przy tak dużym odkształceniu istotne jest, w jakie narządy wewnętrzne oddany jest strzał, ponieważ uszkodzenia w tkankach są zależne m.in. od ich uwodnienia, ukrwienia, elastyczności, gęstości i sposobu rozmieszczenia podścieliska, w tym włókien kolagenowych i włókien sprężystych. Deformacja ponad 5 cm może być wystarczająca, żeby spowodować podbiegnięcia krwawe przedniej ściany komory serca albo przegrody międzykomorowej skutkując zaburzeniami rytmu serca. Zależne od miejsc uderzenia odkształcenie może powodować złamanie żeber, które powodują stłuczenie mięszu płucnego, a w przypadku gdy ostre, spiczaste fragmenty żebra wbijają się w mięsz płuca, może prowadzić do krwotoku do jamy opłucnej lub wystąpieniem odmy opłucnej. Gdyby taki uraz wystąpił bezpośrednio na przedniej powierzchni wątroby, to mogłoby dojść do pojawienia się krwiaka podtorebkowego.

W przypadku powstałych deformacji bloku żelu balistycznego osłanianego przez pakiet balistyczny z tkanin trójosiowych na poziomie 4,20 cm stwierdzono,

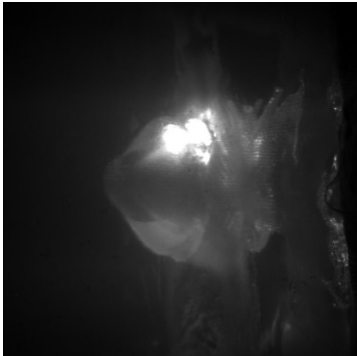
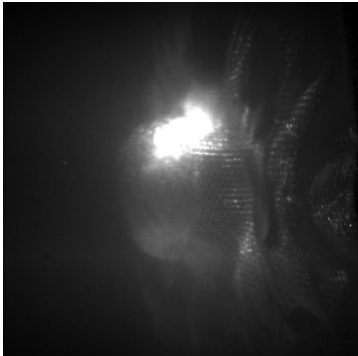
że w warunkach ostrzału człowieka może to skutkować rozerwaniem i miejscowym miażdżeniem tkanki naskórka. Następstwem powstałej deformacji, w zależności od miejsca uderzenia, może być przerwanie ciągłości naczyń krwionośnych prowadzące do wylewu krwi w tkankach lub krwotok do jamy ciała. Obrażenia naczyń klatki piersiowej mogą prowadzić do podbiegnięcia krwawego przedniej ściany komory serca oraz do złamania żebra, które może prowadzić do miejscowego uszkodzenia i rozerwania mięszu płuc. Przy deformacji rzędu 4 cm obrażenia wewnętrzne będą jednak mniejsze i mogą prowadzić do łagodniejszych zmian chorobowych.

W drugiej kolejności analizowano wielkość otworu na powierzchni bloku balistycznego dla badanych pakietów tekstylnych. W fazie wejściowej deformacji podłoża balistycznego powierzchnia otworu była większa w przypadku ostrzału pakietu z tkanin trójosiowych. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosiowych wielkość otworu początkowego wynosiła od 6,1 do 6,9 cm, natomiast dla pakietu z tkaniny trójosiowej od 7,3 do 8,2 cm.

Na podstawie konsultacji medycznych stwierdzono, że im większa powierzchnia, na którą działa uraz, tym lżejsze powstają obrażenia wewnętrzne. Dlatego też zakres obrażeń wewnętrznych może być mniejszy w przypadku pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych niż pakietu z tkanin dwuosiowych. Dla obu pakietów balistycznych stwierdzono, że na powierzchni naskórka doszłoby do znacznego rozerwania tkanki skóry i pojawienia się podbiegnięć krwawych w obrębie tkanki mięśniowej spowodowanej pęknięciem naczyń krwionośnych. Sińce i podbiegnięcia krwawe mogą pojawić się również w obrębie płuc i serca. Dr n. med. Anna Smędra podkreśliła, że rozmiar podbiegnięć krwawych zależy nie tylko od siły działającej na ciało i czasu trwania urazu, ale także od struktury oraz unaczynienia uszkodzonych tkanek.

W tabeli 6.1 przedstawiono wybrane obrazy stożków odkształcenia podczas uderzenia pocisku w pakiety balistyczne z tkanin dwuosiowych i trójosiowych.

Tabela 6.1. Obrazy stożków odkształcenia podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny z tkanin dwuosioowych i trójosiowych przy zastosowaniu podłoża z żelu balistycznego

PAKIET BALISTYCZNY Z TKANIN DWUOSIOOWYCH	PAKIET BALISTYCZNY Z TKANIN TRÓJOSIOOWYCH
t = 1,2405 ms	t = 1,2405 ms
	

Analizując obrazy deformacji tylnej warstw pakietów w wyniku niepenetrującego uderzenia pocisku Parabellum 9 x 19 mm FMJ, zauważono różnice w kształcie powstałego wgłębienia. W przypadku pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych występuje charakterystyczny kształt ostrosłupa. Dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych występuje deformacja w postaci kształtu sferycznego, który jest wynikiem bardziej izotropowych własności tkaniny trójosiowej. Charakter powstałych odkształceń w bloku żelu balistycznego odzwierciedla wygląd powstałych wgłębień w plastelinie balistycznej. Tak jak w przypadku badań eksperymentalnych z użyciem plasteliny balistycznej, wyniki zostały poddane interpretacji medycznej. Wysłunięto podobne wnioski stwierdzając, iż pakiet z tkanin trójosiowych przyczynia się do mniejszych obrażeń wewnętrznych w ciele człowieka przy jednocześnie większej ranie jamy wlotowej. Dlatego też dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych mogą wystąpić na powierzchni ciała większe sińce, rozerwania oraz zmiażdżenia naskórka. Deformacja w kształcie ostrosłupa przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych może przyczyniać się do większych obrażeń wewnętrznych niż do urazów powierzchniowych. Tego typu obrażenia mogą powodować złamania żeber, chrząstek żebrowych, mostka oraz w skrajnych przypadkach prowadzić do rozerwania mięszu płuc i podbiegnięć krwawych w okolicach mięśnia sercowego.

7. BADANIA NUMERYCZNE I EKSPERYMENTALNE FIZJOLOGICZNYCH SKUTKÓW UDARU BALISTYCZNEGO PO NIEPENETRUJĄCYM UDERZENIU POCISKU W CIAŁO CZŁOWIEKA

7.1. Założenia do badań

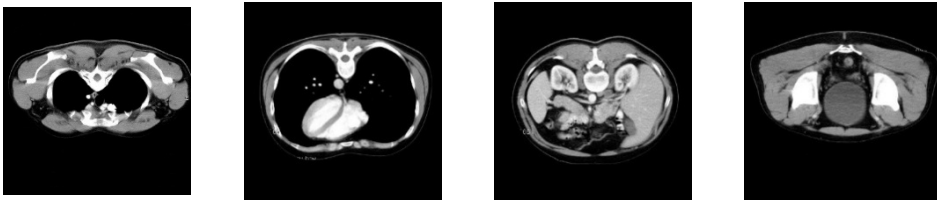
Efektywność balistyczną pakietów złożonych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych porównano numerycznie i eksperymentalnie z punktu widzenia fizjologicznych skutków udaru balistycznego po niepenetrującym uderzeniu pocisku w model ciała człowieka. Przed przystąpieniem do badań numerycznych w programie LS-Dyna oraz testów w Laboratorium Badań Balistycznych, wytypowano obszary ciała człowieka poddane działaniu penetratora. W tym celu przeprowadzono konsultacje ze specjalistą z zakresu medycyny dr n. med. Anną Smędrą i wyznaczono miejsca uderzenia pocisku, które z punktu widzenia obrażeń wewnętrznych i zewnętrznych mogą przyczynić się do utraty zdrowia, a nawet życia człowieka. Wytypowane miejsca zarówno w badaniach numerycznych, jak i w eksperymentach były zlokalizowane w następujących obszarach:

- jama klatki piersiowej
 - uderzenie pocisku w mostek na linii położenia serca,
 - uderzenie pocisku w układ kostny na linii położenia żebra II,
 - uderzenie pocisku w okolicę międzyżebrową na linii położenia płuc,
- jama brzuszna
 - uderzenie pocisku na linii położenia wątroby,
 - uderzenie pocisku na linii położenia jelita cienkiego i grubego.

7.2. Model geometryczny korpusu ciała człowieka

Model geometryczny korpusu ciała człowieka opracowano korzystając z sekwencji obrazów będących poprzecznymi przekrojami narządów wewnętrznych wykonanych przy pomocy tomografu komputerowego. Osobą badaną był mężczyzna w wieku 25-30 lat bez nadwagi. Obszar badań radiologicznych obejmował jamę klatki piersiowej, jamę brzuszną oraz jamę miednicy. W opracowanym modelu geometrycznym ciała człowieka uwzględniono najważniejsze organy, określone na podstawie konsultacji medycznych z dr n. med. Anną Smędrą, które decydują o utrzymaniu funkcji życiowych: mięsień serca, tętnicę główną – aortę, płuca wraz z tchawicą, wątrobę, układ kostny obejmujący klatkę piersiową wraz z mostkiem, kręgosłupem oraz miednicą, rdzeń kręgowy w kanale kręgowym, śledzionę, nerki, jelito cienkie i grube, układ mięśniowy wraz ze skórą.

Sekwencję obrazów poprzecznych przekrojów narządów wewnętrznych ciała człowieka wykonano za pomocą tomografu komputerowego SOMATOM PLUS 4 w Samodzielnym Publicznym Zakładzie Opieki Zdrowotnej w Wieluniu. W wyniku przeprowadzonego badania radiologicznego uzyskano komplet przekrojów poprzecznych ciała o kroku skanowania wynoszącym 4 mm. Badanie radiologiczne było przeprowadzone z kontrastem i na podstawie otrzymanych zdjęć w skali szarości zidentyfikowano położenie poszczególnych wytypowanych do modelowania organów. Na rys. 7.1 przedstawiono wybrane obrazy z badania radiologicznego, które umożliwiły opracowanie modelu geometrycznego ciała człowieka.



Rys. 7.1. Wybrane obrazy poprzeczne narządów wewnętrznych z badania za pomocą tomografu komputerowego

Kolejny etap opracowywania modelu geometrycznego ciała człowieka polegał na imporcie obrazów do specjalistycznego programu komputerowego 3D-Doctor, który służy do trójwymiarowego odtwarzania geometrii obiektów na podstawie sekwencji dwuwymiarowych przekrojów poprzecznych. Program 3D-Doctor zaliczany jest do programów technologii inżynierii odwrotnej (ang. *Reverse Engineering*). Proces odtworzenia obiektu 3D polega na precyzyjnym zdefiniowaniu granic obiektu, a następnie za pomocą odpowiednich funkcji renderingu powierzchniowego i objętościowego wygenerowanie modelu trójwymiarowego.

Ostatni etap opracowania modelu geometrycznego ciała człowieka polegał na uzyskaniu gładkich powierzchni modelowanych organów z chmury punktów uzyskanych za pomocą programu 3D-Doctor. W tym celu zastosowano oprogramowanie Geomagic Designe X, który daje możliwość automatycznego wygenerowania powierzchni na podstawie chmury punktów i ewentualnej ich naprawy oraz modyfikacji powierzchni obiektu. Pozwoliło to na wygenerowanie powierzchni każdego z organów wewnętrznych na podstawie „chmury punktów”, a następnie za pomocą odpowiednich narzędzi wyeliminowanie nieciągłości w powierzchni modelowanych narządów poprzez zamknięcie otworów oraz ich wygładzenie. W modelu geometrycznym ciała położenie poszczególnych organów wewnętrznych było zgodne z budową anatomiczną ciała człowieka. Modele organów wewnętrznych wykonano tak, aby ich geometrie nie przenikały się między sobą. Było to istotne z punktu widzenia poprawnego przeprowadzenia obliczeń numerycznych.

7.2.1. Model geometryczny warstw pakietu balistycznego

W kolejnym etapie, korzystając z oprogramowania Geomagic Design X, opracowano model geometryczny warstw pakietu balistycznego dopasowanego do krzywizny ciała człowieka, gdzie poszczególne warstwy modelowano w postaci zhomogenizowanych powłok 2D. Na rys. 7.2 pokazano model ciała człowieka wraz z modelem pakietu balistycznego dopasowanego do jego krzywizny jak również przód i tył wykonanego pakietu.

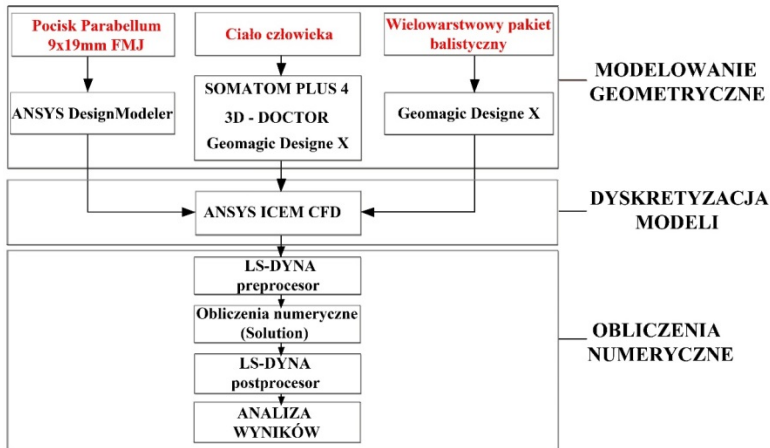


Rys. 7.2. Model geometryczny pakietu balistycznego w postaci zhomogenizowanych powłok 2D

Proces wykonania poszczególnych powłok 2D warstw pakietu balistycznego polegał na wykorzystaniu funkcji programu Geomagic Design X i wyznaczeniu szkicu na zewnętrznej powierzchni obiektu, w tym przypadku był to przód modelu ciała człowieka, i przy pomocy odpowiednich funkcji wygenerowanie dopasowanej warstwy w postaci powłoki 2D. Następny etap polegał na wygenerowaniu modeli kolejnych warstw pakietu balistycznego. W tym celu opracowaną warstwę powielono zachowując stałą wielkości skalującą i odległość rozgraniczającą kolejne powłoki tak, aby ich płaszczyzny nie przenikały się między sobą. Stosując taką metodykę wykonano wielowarstwowy pakiet składający się z 30 powłok. Dodatkowo do pakietu balistycznego wygenerowano warstwę zewnętrzną będącą 31 warstwą, której zadaniem było odwzorowanie tkaniny Cordura, stosowanej w praktyce jako poszycie zewnętrzne kamizelki kuloodpornej.

7.2.2. Metodyka badań numerycznych dla modelu korpusu ciała człowieka

Badania numeryczne dla każdego z wytypowanych obszarów ostrzału ciała człowieka przeprowadzono w programie LS-Dyna. Poniżej na rys. 7.3 zamieszczono schemat blokowy obrazujący etapy badań numerycznych, umożliwiające przeprowadzenie oceny fizjologicznych skutków uderzenia balistycznego podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w ciało człowieka chronionego przez pakiety balistyczne z tkanin dwuosiowych i trójosiowych.



Rys. 7.3. Schemat blokowy obrazujący etapy badań numerycznych

Model ciała człowieka chroniony był przez wielowarstwowy pakiet balistyczny składający się z dopasowanych powłok 2D. Dla modeli geometrycznych warstw pakietu balistycznego wygenerowano siatkę elementów skończonych o wymiarach krawędzi do 5 mm, typ siatki Hexa/Shell. Kolejny etap realizacji badań numerycznych polegał na generacji siatek elementów skończonych dla modeli geometrycznych narządów wewnętrznych, które wykonano w programie ANSYS ICEM CFD.

7.2.3. Warunki początkowe i brzegowe do badań numerycznych

Warunki początkowe i brzegowe dla większości zaawansowanych programów bazujących na metodzie elementów skończonych można ustalać już na etapie modelowania numerycznego. W celu symulowania wirtualnego zszycia 30 warstw pakietu balistycznego w programie ANSYS ICEM CFD użyto funkcji CONSTRAINED_TIE_BREAK i związane poszczególne węzły krawędziowe wszystkich warstw, łącząc je według schematu: 1 warstwę z 2 warstwą,

2 warstwę z 3 warstwą itd. W konsekwencji zapewniło to wiarygodne odwzorowanie zachowania numerycznego modelu pakietu balistycznego jak w przypadku rzeczywistej osłony balistycznej. Dla zewnętrznej warstwy, będącej 31 powłoką 2D, pełniącą funkcję poszycia kamizelki, korzystając z opcji BOUNDARY_SPC_SET węzły krawędziowe na ramionach, na prawym i lewym boku zamocowano tak, aby nie przemieszczały się w żadnym z kierunków układu współrzędnych xyz . Tego rodzaju rozwiązanie pozwoliło na modelowanie zapięcia w kamizelce kuloodpornej.

Istotnym etapem przygotowania modelu do badań numerycznych było ustalenie kontaktujących się obiektów, jak również określenie typu kontaktu i współczynników tarcia. Podobnie jak podczas realizacji poprzednich badań numerycznych zastosowano typ kontaktu AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Przyjęto następujące kontakty wraz ze współczynnikami tarcia statycznego i dynamicznego, których wartości dobrano na podstawie przeglądu literatury, a w szczególności publikacji Lim i in. (2003), Roberts i in. (2005, 2007), Tan i in. (2008), Rao i in. (2009), Shen i in. (2010), Maréchal i in. (2011):

- pomiędzy sąsiadującymi powłokami pakietu balistycznego – $\mu_d = 0,10$; $\mu_s = 0,10$
- pomiędzy płaszczem a rdzeniem pocisku – $\mu_d = 0,80$; $\mu_s = 0,80$
- pomiędzy płaszczem pocisku a kolejnymi powłokami pakietu – $\mu_d = 0,28$; $\mu_s = 0,30$
- pomiędzy rdzeniem pocisku a kolejnymi powłokami pakietu – $\mu_d = 0,28$; $\mu_s = 0,30$
- pomiędzy płaszczem pocisku a narządami ciała człowieka – $\mu_d = 0,20$; $\mu_s = 0,20$
- pomiędzy rdzeniem pocisku a narządami ciała człowieka – $\mu_d = 0,20$; $\mu_s = 0,20$
- pomiędzy sąsiadującymi narządami ciała człowieka – $\mu_d = 0,17$; $\mu_s = 0,17$.

Ostatni etap definiowania warunków początkowych i brzegowych w przygotowaniu modelu do obliczeń numerycznych polegał na przyjęciu modeli materiałowych dla pakietu balistycznego. W tym celu zastosowano wcześniej zweryfikowane modele materiałowe. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosiowych zastosowano *MAT_ORTHO_ELASTIC_PLASTIC, natomiast dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. W przypadku zewnętrznej warstwy pakietu balistycznego pełniącej funkcję poszycia pakietu zastosowano model materiałowy *MAT_ELASTIC. Parametry mechaniczne dla modelu materiałowego Cordury przyjęto na podstawie literatury Nilakantan i in. (2008), Utracki (2010). Kompletny model do badań numerycznych składał się z układu „pocisk – pakiet balistyczny – ciało człowieka” i posiadał ok. 6 mln elementów skończonych, co wymagało prowadzenia obliczeń dla jednego wariantu uderzenia przez okres jednego tygodnia.

7.3. Wstęp do badań eksperymentalnych

7.3.1. Wprowadzenie do badań

Poznanie skali obrażeń oraz wielkości urazów powstałych w wyniku niepenetrującego uderzenia pocisku w ciało człowieka chronione przez kamizelkę kuloodporną jest zagadnieniem trudnym i skomplikowanym. Z punktu widzenia etyki nie można takich badań realizować z udziałem ludzi. Praktycznie podczas każdego niepenetrującego uderzenia pocisku zachodzi proces uszkodzania narządów i tkanek ciała o skali zależnej od parametrów pocisku i efektywności balistycznej osłony. Skale powstałych obrażeń, urazów czy schorzeń, na które narażeni są funkcjonariusze policji czy wojskowi są bardzo liczne i różnorodne, opisano je m.in. w publikacjach: DiMaio (2003), Zieliński i in. (2010), Dembek i in. (2011). Ujednolicona ocena wielkości powstałych ran została wprowadzona przez Couplanda (1992, 1999). Opracowano wówczas klasyfikację obrażeń ran postrzałowych, biorąc pod uwagę stan ранego i rodzaje doznanych urazów. W praktyce obrażenia mechaniczne zwykło się dzielić na przenikające otwarte lub penetrujące, w których uszkodzona jest ciągłość powłoki ciała oraz nieprzenikające niepenetrujące lub obrażenia zamknięte, w których ciągłość powłoki ciała nie jest przerwana. Jednakże brak usystematyzowanego kryterium zjawiska traumy balistycznej dla jamy klatki piersiowej i jamy brzusznej przyczynia się do realizacji szerokich badań naukowych pokazujących skalę problemu.

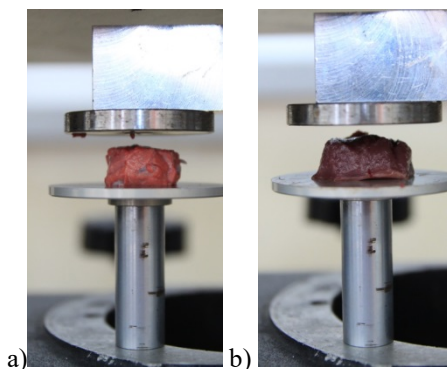
W przeglądzie literatury opisano dotychczasowe badania związane z analizą fizjologicznych skutków w wyniku dynamicznego uderzenia w ciało człowieka z zastosowaniem metod numerycznych i eksperymentalnych. Należy stwierdzić, że ocena urazów na skutek niepenetrującego uderzenia pocisku przeprowadzona na zwłokach ludzkich jest niewątpliwie najbardziej wiarygodnym sposobem oceny traumy balistycznej. Istnieje jednak bardzo ograniczona liczba tych badań. Wynika to z problemu statusu moralnego zwłok oraz wymagań etycznych dotyczących badawczego wykorzystania ludzkiego ciała po śmierci. Niewątpliwie znaczące badania w ocenie traumy balistycznej były również realizowane na osobnikach zwierzęcych.

Przedstawione w publikacjach wyniki badań z wykorzystaniem fizycznych modeli ciała człowieka, uwzględniających najważniejsze organy wewnętrzne, pozwoliły poznać i ocenić skalę traumy balistycznej. Zaproponowane przez autorów innowacyjne podejście do oceny fizjologicznych skutków udaru oraz przyjęta metodyka wykonania homogennego modelu klatki piersiowej człowieka, stały się inspiracją do przygotowania własnego fizycznego modelu torsu męczyzny posiadającego najważniejsze organy decydujące o funkcjach życiowych, tj.: serce, płuca, układ kostny i mięśniowy.

7.3.2. Model fizyczny płuc i serca

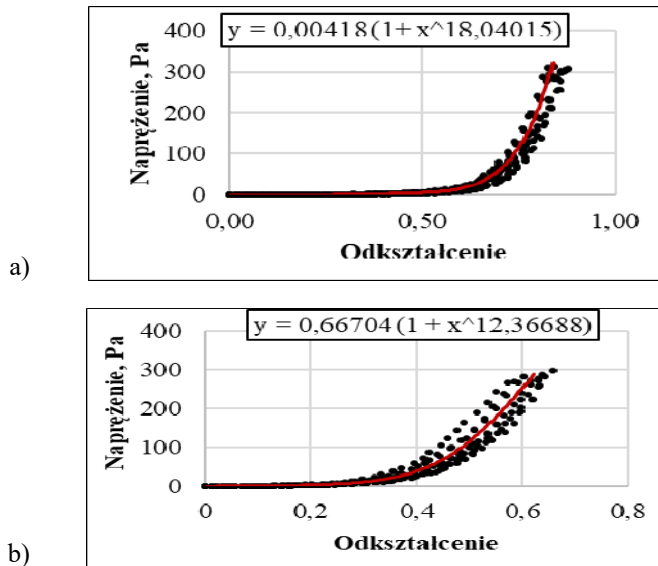
Obrażenia płuc i serca powstałe podczas niepenetrującego uderzenia pocisku bezpośrednio zagrażają życiu osoby rażonej. Z tego powodu w modelu fizycznym ciała człowieka, opracowanego w ramach pracy doktorskiej, umieszczono modele płuc i serca wykonane z silikonu. W celu doboru parametrów silikonu przeprowadzono w pierwszym etapie badania statycznego ściskania jednoosiowego wypreparowanych próbek z organów płuc i serca pochodzących od świni i wyznaczono charakterystyki naprężenia w funkcji odkształcenia materiału.

Eksperymentalne próby statycznego ściskania przeprowadzono na wypreparowanych próbkach. Badania wykonano na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Instron wyposażonej w czujnik siły oraz czujnik przemieszczenia. Z narządów zwierzęcych płuc i serca przygotowano po 10 próbek o wymiarach: średnica $d = 20$ mm i wysokość $h = 10$ mm. Każdą z próbek umieszczono między dwiema płaskimi płytami. Stanowisko badawcze wyposażono w sprzęt komputerowy umożliwiający rejestrację zmiany siły w zależności od przemieszczenia się płyty ruchomej poruszającej się ze stałą prędkością 2 mm/s. Poniżej na rys. 7.4 przedstawiono umieszczone próbki narządów płuc i serca na maszynie wytrzymałościowej przed procesem ściskania.



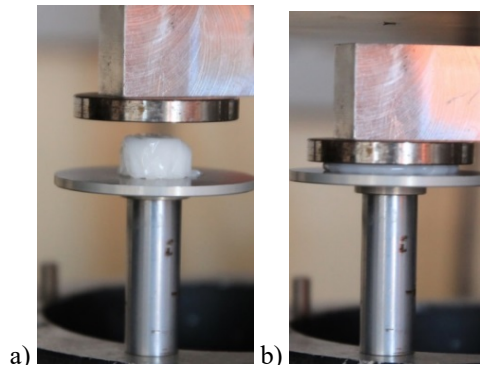
Rys. 7.4. Próbki organów pochodzące od świni przed procesem ściskania:
a) płuca, b) serce

Na podstawie otrzymanych wyników przeprowadzono obliczenia, tak aby wyznaczyć aproksymowaną krzywą zmieniającego się naprężenia w zależności od odkształcenia. Poniżej na rys. 7.5 przedstawiono otrzymane charakterystyki dla płuc i serca.



Rys. 7.5. Krzywa aproksymująca wyniki: a) dla płuc, b) dla serca

W kolejnym etapie prac badawczych przeprowadzono rozeznanie rynku pod kątem materiałów, które mogą odwzorować właściwości mechaniczne płuc i serca. Do badań wytypowano silikon służący do wykonywania form i reprodukcji, który znajduje zastosowanie w odlewnictwie artystycznym. W celu wykonania modeli narządów serca i płuc zastosowano silikon, który otrzymano w wyniku połączenia: kauczuku polikondensacyjnego, katalizatora N oraz oleju metylosilikonowego.



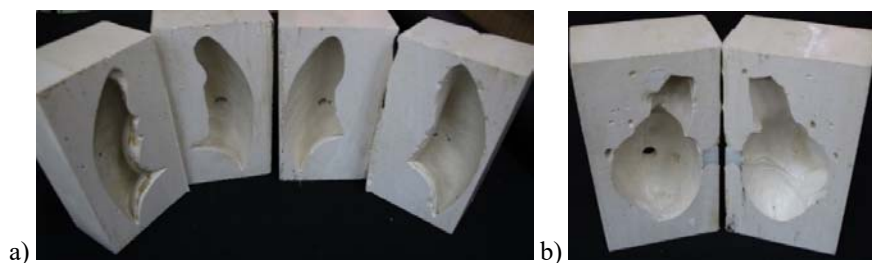
Rys. 7.6. Próbkę silikonu: a) przed procesem ściskania, b) po procesie ściskania

Wykonanie modeli płuc i serca, tak aby odpowiadały rzeczywistym tkankom świni było możliwe jedynie dzięki przeprowadzeniu serii badań jednoosiowego

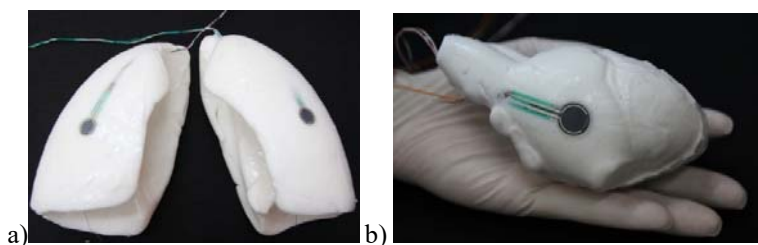
ściskania próbek dla różnych proporcji wagowych pomiędzy kauczukiem polikondensacyjnym, katalizatorem N i olejem metylosilikonowym. W tym celu dla każdego z narządów dobrano sześć wariantów składników i wykonano po pięć próbek o średnicy 20 mm i wysokości 10 mm. Na rysunku 7.6 przedstawiono przykładowe zdjęcia z badań jednoosiowego ściskania dla próbek będących mieszaniną: kauczuku polikondensacyjnego, katalizatora N i oleju metylosilikonowego przed i po procesie ściskania.

Na podstawie otrzymanych wyników badań ściskania próbek wyznaczono charakterystyki zależności naprężenia w funkcji odkształcenia. Zauważono, że w wyniku modelowania składu chemicznego próbek można uzyskać przebieg krzywej ściskania zbliżony do krzywej dla płuc pochodzących od świni. W analogiczny sposób dobrano proporcje składników do opracowania silikonowego modelu serca.

W kolejnym etapie, korzystając z modelu anatomicznego ciała mężczyzny o rzeczywistych wymiarach, wykonano gipsowe odlewy płuc i serca. Wykonane z tworzywa sztucznego serce i płuca umieszczono w oddzielnych skrzyniach, które wypełniono gipsem modelarskim. Odlewy pozostawiono na okres jednego tygodnia do całkowitego związania i wyschnięcia. Po tym czasie rozcięto gipsowe bryły i uzyskano niezależne formy narządów. Powierzchnię gipsowych form zabezpieczono szybko schnącą emulsją gruntową, która wyeliminowała możliwość zabrudzenia pyłem gipsu modeli organów płuc i serca. Poniżej na rys. 7.7 przedstawiono otrzymane gipsowe formy.



Rys. 7.7. Gipsowe formy: a) prawego i lewego płata płuc, b) serca



Rys. 7.8. Modele: a) płuca prawego i lewego, b) serca

W celu pomiaru ciśnienia wywieranego na płuca i serce podczas niepenetrującego uderzenia pocisku na skutek uderzenia balistycznego zastosowano czujniki siły nacisku. Przed przystąpieniem do wypełnienia formy płuc silikonem formę pokryto folią w celu łatwiejszego wyciągnięcia gotowego modelu. Na folii w przedniej części płuca prawego i lewego umieszczono czujniki siły nacisku. Formy płuc wypełniono następnie mieszaniną i odstawiono do sieciowania na 24 godziny. Poniżej na rys. 7.8 przedstawiono uzyskane modele płuca prawego i lewego wraz z czujnikami oraz wykonany model serca od przodu z widocznym czujnikiem siły nacisku.

7.3.3. Model fizyczny korpusu ciała człowieka

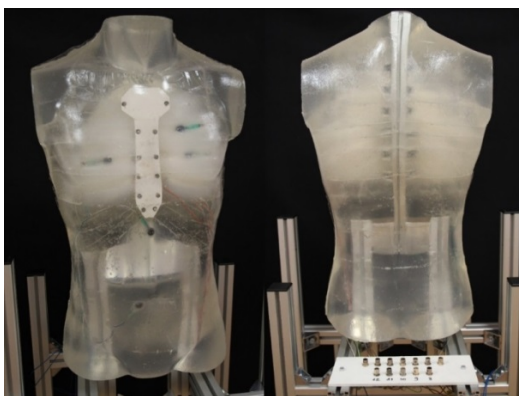
W pierwszym etapie opracowania fizycznego modelu korpusu mężczyzny wykonano formę ciała człowieka, która posiadała rzeczywiste wymiary klatki piersiowej mężczyzny. W tym celu zdecydowano się na zastosowanie manekina odzieżowego o budowie charakteryzującej się odpowiednimi proporcjami, odpowiadającymi grupie typologicznej mężczyzn w wieku 25-30 lat. Reprezentatywny manekin odzieżowy był wykonany z pianki poliuretanowej. Głównym założeniem przy realizacji modelu torsu mężczyzny było uwzględnienie klatki piersiowej, gdyż w niej znajdują się najważniejsze organy wewnętrzne. Następnym etapem było przygotowanie skrzyni o wymiarach uwzględniających naddatek formy w stosunku do zewnętrznych wymiarów manekina. Manekin odzieżowy został zamocowany w skrzyni tak, aby nie zmieniał swojego położenia w trakcie procesu wypełniania wolnych przestrzeni mieszaniną gipsu modelarskiego i wody. Kolejny etap przygotowania formy polegał na usunięciu po trzech dniach płyt skrzyni od gipsowej bryły w celu zapewnienia równomiernego odparowania wody. Gipsową bryłę przez okres ponad 2 miesiące pozostawiono do całkowitego wyschnięcia. Po tym okresie została przecięta wzdłużnie, co pozwoliło na uzyskanie formy odlewu przodu i tyłu manekina bieliznianego męskiego po usunięciu jego resztek. Powierzchnię gipsowych form przodu i tyłu manekina pokryto kilkoma warstwami szybko schnącej emulsji gruntowej w celu wyeliminowania możliwości zabrudzenia żelu balistycznego pyłem gipsu.

W drugim etapie przystąpiono do prac związanych z przygotowaniem modelu układu kostnego składającego się z mostka, żeber oraz kręgosłupa. W pracy model mostka został wykonany za pomocą nowoczesnej frezarki Bungard CCD, która sterowana była przez oprogramowanie zgodnie z zaprojektowaną formą modelu. Formę mostka wycięto z płyty porowatej PVC o grubości 10 mm.

Następnym zadaniem przy realizacji układu kostnego było wykonanie serii modeli żeber. Żebra wykonano z płaskowników o grubości 6 mm i szerokości 20 mm wykonanych z tworzywa sztucznego pleksiglas. W celu odwzorowania kształtu żebra, każdą z listewek poddano obróbce cieplnej, która umożliwiła

uformować poszczególne żebra. Wykonanie modelu układu kostnego polegało na precyzyjnym zamocowaniu każdej pary żeber w ustalonym miejscu na kręgosłupie oraz mostku. Model kręgosłupa dopasowano do krzywizny gipsowej formy tyłu manekina. Wykonano go z aluminiowego profilu posiadającego cztery kanały, które umożliwiły montaż za pomocą śrub poszczególnych modeli żeber.

Po przygotowaniu modelu układu kostnego przystąpiono do etapu uzupełnienia klatki piersiowej o organy wewnętrzne. Ze względu na trudności związane z utrzymaniem stałego położenia organów w klatce piersiowej, zdecydowano się na wykonanie skrzyni, w której zatopiono serce i płuca tworząc jedną całość. Skrzynie wraz z organami wypełniono ciekłym żel balistycznym *Clear Ballistics* i pozostawiono do całkowitego związania na okres 24 godzin, po czym wyjęto całość i umieszczono w klatce piersiowej. Następnie układ kostny z płucami i sercem umieszczono w gipsowych formach korpusu i wprowadzono do środka czujniki siły nacisku, które umieszczono w ustalonych miejscach po wcześniejszych konsultacjach medycznych. W ostatnim etapie roztopiono żel balistyczny *Clear Ballistics* i stopniowo zalano nim gipsowe formy ciała człowieka. Całość pozostawiono do całkowitego zastygnięcia na okres 24 godzin, a następnie wyjęto gotowy model z formy gipsowej. Na rys. 7.9 zamieszczono zdjęcie wykonanego modelu ciała człowieka.



Rys. 7.9. Model ciała człowieka wraz z sercem, płucami, układem kostnym i mięśniowym oraz czujnikami siły nacisku

7.3.4. Metodyka badań eksperymentalnych w tunelu balistycznym

Ocenę fizjologicznych skutków udaru balistycznego przeprowadzono z użyciem opracowanego modelu fizycznego korpusu ciała człowieka oraz pakietów wykonanych z tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29. Przed przystąpieniem do badań eksperymentalnych w tunelu balistycznym przygotowano

pakiety balistyczne składające się z 30 warstw tkanin dwuosioowych i trójosiowych Kevlar 29. Poszczególne warstwy pakietu balistycznego wykrojono zgodnie z przygotowanym szablonem przodu opracowanym na podstawie wymiarów klatki piersiowej modelu fizycznego ciała człowieka. Warstwy pakietu balistycznego połączono poprzez przeszycie nicią aramidową 100% Twaron, NM 50/2. W dalszym etapie czujniki rejestrujące siły nacisku podłączono do oscyloskopów cyfrowych wielokanałowych i zgodnie z wytypowanymi miejscami ostrzału, do każdego z pakietów balistycznych oddano po pięć uderzeń pociskiem Parabellum 9 x 19 mm FMJ firmy Winchester. Przebieg ostrzału w tunelu balistycznym rejestrowano za pomocą kamery do szybkiej rejestracji CORDIN 535D.

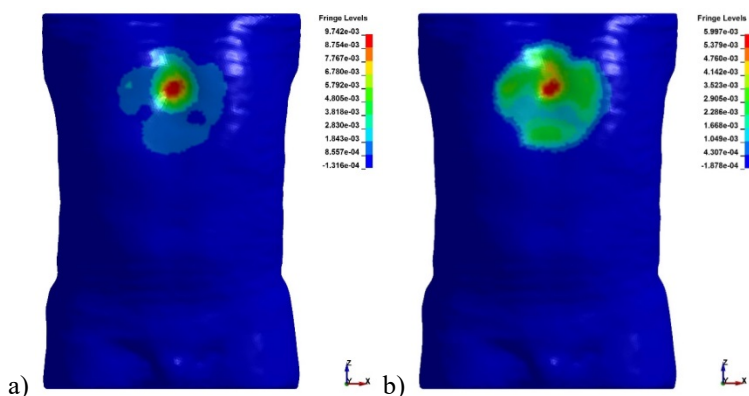
W wyniku przeprowadzonych badań oceniono wpływ zastosowanego pakietu balistycznego na wielkości ciśnień w miejscu uderzenia pocisku. Wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych poddano medycznej analizie, co pozwoliło zdiagnozować poziom i skalę fizjologicznych skutków udaru balistycznego w zależności od badanego miękkiego pakietu tekstylnego.

7.4. Analiza fizjologicznych skutków udaru balistycznego

7.4.1. Uderzenie pocisku w mostek na linii położenia serca

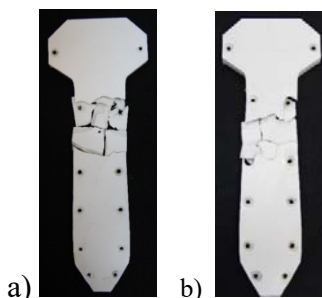
Charakter oraz następstwa fizjologicznych skutków udaru balistycznego będącego efektem niepenetrującego uderzenia pocisku zależą od anatomicznego miejsca trafienia. Istotne znaczenie, z punktu widzenia analizy fizjologicznych skutków udaru balistycznego w zależności od danego pakietu balistycznego, może wynikać z wartości deformacji oraz jej sposobu rozkładu na powierzchni ciała. Na rys. 7.10 przedstawiono deformację powierzchni ciała człowieka w zależności od zastosowanego pakietu balistycznego po czasie równym 0,5 ms od chwili uderzenia pocisku podczas badań numerycznych. Po czasie równym 1 ms od chwili uderzenia pocisku wartość maksymalnej deformacji ciała człowieka przy ochronie pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych wynosiła ok. 1 cm, natomiast dla pakietu z tkanin trójosiowych ok. 0,68 cm.

Na podstawie analizy wyników (rys. 7.10) pod kątem rozkładu deformacji na powierzchni ciała człowieka zauważono, iż podczas zastosowania pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych uwidocznił się wpływ jej anizotropowej struktury i na powierzchni ciała można wyróżnić dwa kierunki rozprzestrzeniania się odkształceń. W wyniku ochrony ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin trójosiowych zauważono mniejszą kierunkowość rozchodzenia się deformacji wokół punktu uderzenia pocisku. Jest to wpływ bardziej izotropowych właściwości struktury tkaniny trójosiowej. Należy również zwrócić uwagę, iż dla chwili czasowej równej 0,5 ms, deformacja ciała chronionego przez pakiet balistyczny z tkanin dwuosioowych obejmuje mniejszy obszar niż podczas ochrony ciała pakietem złożonym z tkanin trójosiowych.



Rys. 7.10. Deformacja powierzchni ciała człowieka chronionego przez pakiet balistyczny z tkanin: a) dwuosioowych, b) trójosiowych

Skutki obrażeń wewnętrznych powstałe w wyniku uderzenia pocisku uwidoczniły się na powierzchni ciała człowieka oraz w układzie kostnym. W wyniku przeprowadzonych badań eksperymentalnych zauważono złamania mostka zarówno przy ochronie ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwu-, jak i trójosiowych (rys. 7.11).



Rys. 7.11. Uszkodzenie mostka po badaniach eksperymentalnych dla pakietu balistycznego z tkanin: a) dwuosioowych, b) trójosiowych

Podczas oceny obrażeń zewnętrznych fizycznego modelu ciała człowieka po badaniach eksperymentalnych, zaobserwowano miejscowe mikrouszkodzenia żeluz balistycznego. Największe obrażenia wewnętrzne zaobserwowano w mostku. Podczas ochrony ciała pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych, jak i trójosiowych mostek uległ licznym pęknięciom, przy czym liczba pęknięć odłamków mostka była większa podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny z tkanin dwuosioowych. Medyczna analiza zaistniałej sytuacji wskazuje, że w wyniku przerwania ciągłości anatomicznej mostka może dojść do uszkodzenia wewnętrznych struktur naczyniowo-nerwowych chronionych przez mostek. Szczególną specyfiką złamania kości w odróżnieniu od innych uszkodzeń jest to, iż są to złamania wieloodłamkowe, w których odłamki mogą stać się pociskami wtórnymi.

W kolejnym etapie analizowano wyniki badań eksperymentalnych i numerycznych w postaci ciśnień wywieranych w ciele człowieka po uderzeniu pocisku w mostek. Stwierdzono, że występują większe wartości ciśnień w mostku podczas ochrony ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych niż z tkanin trójosiowych zarówno w badaniach numerycznych, jak i eksperymentalnych. Można wnioskować, iż w wyniku uderzenia pocisku w pakiet z tkanin dwuosioowych nacisk jest bardziej miejscowy i obejmuje mniejszą powierzchnię ciała, co wpływa na większe ciśnienie w miejscu uderzenia penetratora. W przypadku pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych działająca siła nacisku rozkłada się na większej powierzchni, skutkując mniejszą wartością maksymalnego ciśnienia w miejscu uderzenia pocisku.

7.4.2. Uderzenie pocisku w żebro II

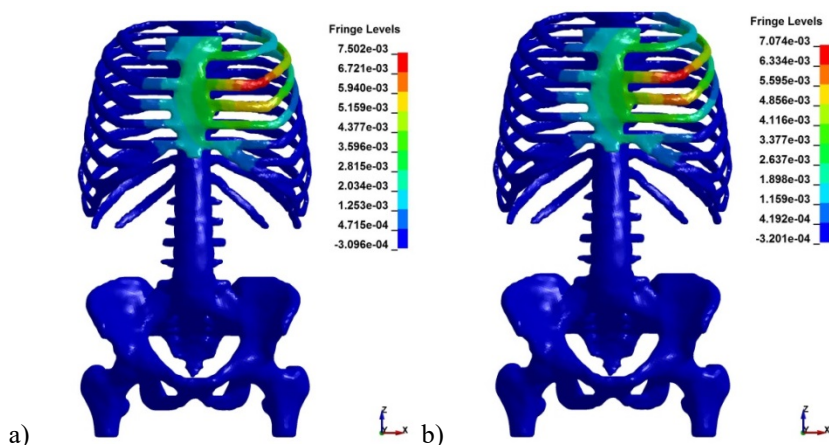
W kolejnym etapie analizowano obrażenia wewnętrzne w modelu ciała człowieka podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w linię położenia drugiego żebra po lewej stronie. W pierwszym etapie dokonano oględzin modelu ciała człowieka w punkcie uderzenia pocisku. Przy ochronie ciała pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych stwierdzono w miejscu uderzenia pocisku pęknięcie żebra, czego nie stwierdzono po uderzeniu w pakiet z tkanin trójosiowych. Na rys. 7.12 pokazano miejsce pękniętego żebra. Z medycznego punktu widzenia złamanie w obrębie trzech pierwszych żeber może przyczynić się do obrażenia dróg oddechowych, natomiast fragmenty złamanego żebra mogą wbijać się w strukturę mięszu płuc, prowadząc do krwotoku wewnętrznego. Badania pokazały, że tego typu obrażenia mogą być ograniczone poprzez zastosowanie miękkiego pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych.



Rys. 7.12. Miejsce pękniętego żebra po badaniach eksperymentalnych

Wyniki badań numerycznych analizowanego wariantu pokazały, że zakres obrażeń zewnętrznych i wewnętrznych obejmuje układ mięśniowy, układ kostny oraz płuca. Na rys. 7.13 przedstawiono deformację układu kostnego po czasie

równym 1 ms od chwili uderzenia pocisku w zależności od zastosowanej struktury tekstylnej. Po tym czasie wartość maksymalnej deformacji na powierzchni żebra II podczas ochrony pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych wynosiła ok. 0,75 cm, natomiast dla pakietu z tkanin trójosiowych ok. 0,70 cm.



Rys. 7.13. Deformacja układu kostnego po czasie równym 1 ms od chwili uderzenia pocisku w ciało człowieka chronione przez pakiet balistyczny z tkanin: a) dwuosioowych, b) trójosiowych

Na podstawie konsultacji medycznych stwierdzono, że obrażenia na skutek uderzenia pocisku w tkankę kostną różnią się od obrażeń zadanych w tkankę mięśniową. Wynika to przede wszystkim z większej sztywności oraz mniejszej elastyczności kości. W badaniach numerycznych przy ochronie ciała pakietem z tkanin dwu- i trójosiowych nie doszło do złamania żebra, może być to wynikiem zastosowania dla układu kostnego parametrów materiałowych dla istoty zbitej.

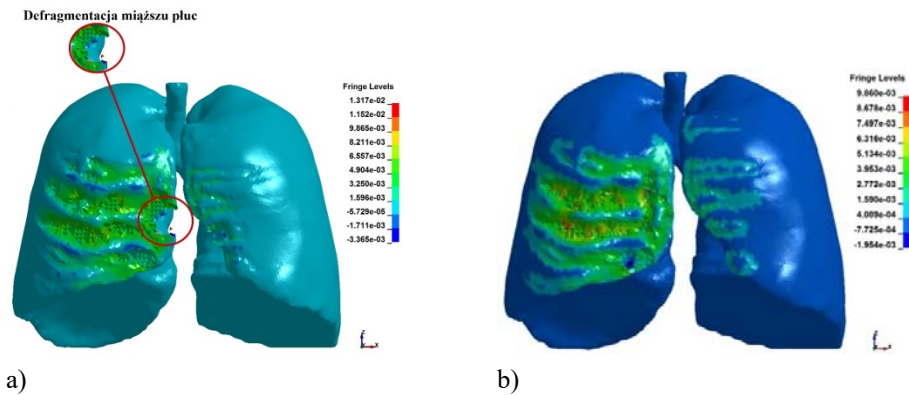
W badaniach eksperymentalnych z użyciem czujników siły nacisku analizowano ciśnienia wywierane na ciało człowieka podczas uderzenia pocisku w drugie żebro. Analizując wyniki zauważono, iż podobnie jak dla wariantu uderzenia pocisku w mostek, wartości ciśnień przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych osiągnęły większe wartości niż dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych.

7.4.3. Uderzenie pocisku w międyżebro na linii położenia płuc

Podstawowym rodzajem zmian w płucach występujących w wyniku nie-penetrującego uderzenia pocisku i odkształcenia osłony balistycznej są lokalne deformacje miąższu płuc, które wywołują pasmowe wylewy wzdłuż żeber. Mechanizm powstawania pasmowych wylewów na powierzchni płuc oraz

ich potencjalnych obrażeń zależy od skali przemieszczenia układu kostnego w strukturę mięszu płuca.

Na podstawie analizy obrazów płuc (rys. 7.14), przy ochronie ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych stwierdzono defragmentację mięszu płuc. Zapoczątkowanie zjawiska defragmentacji mięszu płuc przy ochronie ciała pakietem z tkanin dwuosioowych zaobserwowano po czasie 0,37 ms od uderzenia pocisku, nie zaobserwowano tego zjawiska przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. Podczas wystąpienia defragmentacji mięszu płuc istnieje ryzyko przedostania się powietrza do jamy opłucnej i wystąpieniem odmy opłucnej.



Rys. 7.14. Deformacja mięszu płuc po czasie równym 1 ms od chwili uderzenia pocisku w ciało człowieka chronione pakietem balistycznym z tkanin: a) dwuosioowych, b) trójosiowych

Odma opłucna z medycznego punktu widzenia zachodzi w momencie głębokiego zniszczenia w obrębie płuc i oskrzeli. Z każdym wdechem powietrze dostarczane do oskrzeli trafia do jamy opłucnej i przy wydechu poprzez rozerwane ściany mięszu płuc powietrze kumulowane jest w jamie opłucnej. Dlatego też podczas wdechu następuje wzrost objętości i ciśnienia powietrza, co w konsekwencji powoduje zapadnięcie płuca i prowadzi do wystąpienia odmy otwartej wymagającej szybkiej interwencji lekarza. Analiza medyczna skali obrażeń płuc przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych wykazała, iż możliwość wystąpienia odmy opłucnej jest znikoma. Jednakże na skutek powstałych pasmowych odbić żeber na powierzchni płuc może dojść do wylewów krwi oraz do zgniecenia oskrzeli. Kolejne fazy deformacji płuc podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w ciało chronione przez pakiet balistyczny z tkanin dwuosioowych i trójosiowych przedstawiono na rys. 7.14.

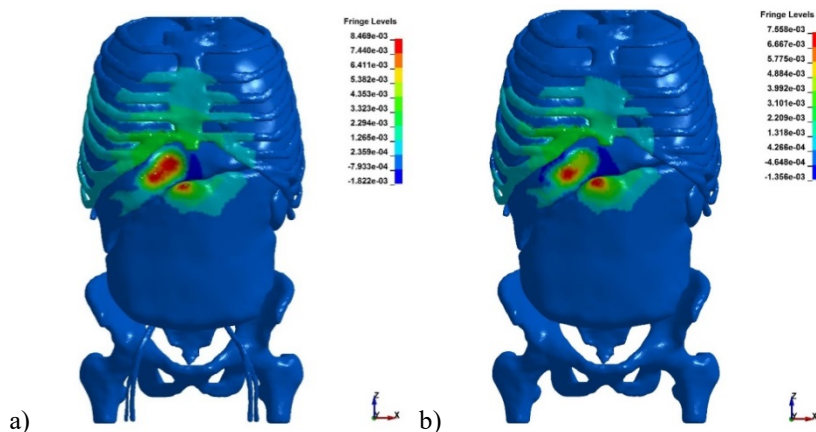
W kolejnym etapie analizowano eksperymentalnie ciśnienia na powierzchni zewnętrznej płuc na skutek niepenetrującego uderzenia pocisku. Analizując wartości ciśnień stwierdzono, że większe jej wartości występują na powierzchni

płuc przy ochronie ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosio-
wych niż pakietem z tkanin trójosiowych zarówno w badaniach numerycznych,
jak i eksperymentalnych. Należy również podkreślić fakt wystąpienia rozbież-
ności w wartościach ciśnień podczas badań numerycznych i eksperymentalnych.
Główną przyczyną zaistniałego problemu jest trudność doboru parametrów
materiałowych dla numerycznego modelu płuc, tak aby odpowiadały parametrom
płuc w badaniach eksperymentalnych.

7.4.4. Uderzenie pocisku na linii położenia wątroby

Jama brzuszna zbudowana jest ze skóry i mięśni, które z łatwością ulegają
deformacji. Wielkość deformacji w ciele człowieka chronionym przez pakiet
balistyczny z tkanin dwuosioowych była na poziomie 2,65 cm, natomiast przy
ochronie pakietem z tkanin trójosiowych wynosiła 2,25 cm.

W wyniku uderzenia pocisku w jamę brzuszną na wysokości wątroby
pojawiły się uszkodzenia wielonarządowe. Na rys. 7.15 przedstawiono widok
zdeformowanych narządów wewnętrznych na skutek uderzenia pocisku podczas
badań numerycznych po czasie równym 1 ms od uderzenia penetratora w zależ-
ności od zastosowanego pakietu balistycznego.



Rys. 7.15. Widok zdeformowanych narządów wewnętrznych na skutek uderzenia pocisku w ciało człowieka chronione przez pakiet balistyczny z tkanin: a) dwuosioowych, b) trójosiowych

Na podstawie konsultacji medycznych stwierdzono, iż w wyniku ochrony
ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych obszar maksy-
malnej deformacji jest większy niż przy ochronie ciała pakietem balistycznym
z tkanin trójosiowych (rys. 7.15). Wykazano również, że przy ochronie pakietem
balistycznym z tkanin dwuosioowych istnieje ryzyko wystąpienia rozerwania
mięszu wątroby, oderwania torebki wątrobowej od mięszu i wytworzenie

krwiaka podtorebkowego. Obrażenia te, przy ochronie ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin trójosiowych, zostały ocenione na lżejsze.

Jednym z najpoważniejszych obrażeń zachodzących w jamie brzusznej jest uszkodzenie wątroby, która wykazuje dużą podatność na urazy. Na podstawie opinii medycznej stwierdzono, iż wątroba jest narządem wewnętrznym, który jest podatny na urazy, przede wszystkim ze względu na swoje rozmiary oraz anatomię umiejscowienia w jamie brzusznej. Podczas ochrony ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosiowych deformacja wątroby w miejscu uderzenia pocisku wynosiła ok. 0,85 cm po czasie 1 ms od uderzenia pocisku, natomiast przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych ok. 0,75 cm. Na podstawie wyników badań numerycznych stwierdzono, że pakiet balistyczny z tkanin trójosiowych umożliwia zmniejszenie wartości i obszaru maksymalnej deformacji w miejscu uderzenia pocisku. W konsekwencji może to prowadzić do zminimalizowania potencjalnych skutków traumy balistycznej w jamie brzusznej, tj.: pęknięcia torebki wątrobowej, wystąpienia krwiaka podtorebkowego i rozerwania mięszu wątroby.

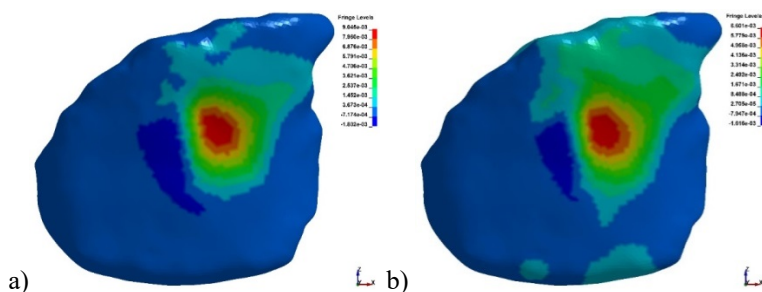
W badaniach eksperymentalnych model ciała człowieka nie posiadał fizycznego narządu wątroby, ale w miejscu jej anatomicznej lokalizacji umieszczono czujnik siły nacisku w celu określenia potencjalnych fizjologicznych skutków udaru wynikających z ciśnień jakie mogą być wywierane na wątrobę. Analizując wyniki stwierdzono, że przy ochronie ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosiowych wartości ciśnień są większe niż podczas ochrony pakietem z tkanin trójosiowych zarówno w badaniach eksperymentalnych, jak i numerycznych. Większe wartości ciśnienia dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosiowych wynikają z charakteru miejscowego odkształcenia osłony i jego oddziaływania na ciało w sposób punktowy. Przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych siła nacisku osłony obejmuje większy obszar ciała, co przekłada się na mniejszą wartość ciśnienia w miejscu uderzenia pocisku.

7.4.5. Uderzenie pocisku na linii położenia jelita cienkiego i grubego

Jednym z rodzajów uszkodzeń jamy brzusznej, które występują podczas niepenetrującego uderzenia pocisku w osłonę balistyczną jest rozerwanie narządów zawierających gazy lub treści pokarmowe. Dzieje się to na skutek zachodzenia mechanizmu ściskania i rozciągania zbiorników gazowych: jelita cienkiego, jelita grubego czy żołądka. Dlatego też potrzeba rozpatrzenia przypadku uderzenia pocisku na linii położenia jelita cienkiego i grubego oraz oceny pod kątem wpływu struktury osłony balistycznej na fizjologiczne skutki traumy balistycznej była konieczna.

Specyfika urazu balistycznego narządów jamy brzusznej w analizowanym przypadku dotyczyła wielu narządów wewnętrznych: układu kostnego, śledziony, nerek, wątroby, aorty oraz jelit. Narządy jamy brzusznej, a w szczególności jelita

będące półpłynnym środowiskiem, narażone są w wyniku niepenetrującego uderzenia na wylewy oraz liczne wybroczyny krwi. Poniżej na rys. 7.16 zilustrowano obrazy deformacji jelit oraz ich przekroje wzdłużne po czasie równym 1 ms od uderzenia pocisku w zależności od badanego pakietu balistycznego.



Rys. 7.16. Deformacja powierzchni jelit po czasie równym 1 ms od uderzenia pocisku w ciało podczas ochrony pakietem balistycznym z tkanin: a) dwuosioowych, b) trójosiowych

W pierwszej kolejności analizowano wartości maksymalnej deformacji w miejscu uderzenia pocisku w zależności od badanego pakietu balistycznego. Stwierdzono, że przy ochronie ciała pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych wartość deformacji jelit była większa niż przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. Dla pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych wartość deformacji powierzchni jelit wynosiła ok. 0,91 mm, natomiast podczas ochrony pakietem balistycznym z tkaniny trójosiowych ok. 0,66 mm.

W modelu ciała człowieka podczas realizacji badań eksperymentalnych w miejscu anatomicznej lokalizacji jelit umieszczono czujnik siły nacisku. Pozwoliło to zarejestrować przebieg ciśnień w obszarze pępkowym. Na podstawie wyników badań numerycznych i eksperymentalnych podczas ochrony ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych wartości ciśnień dla jelit były na podobnym poziomie i wynosiły ok. 16 MPa. W przypadku pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych wartości ciśnień na powierzchni jelit były mniejsze niż przy pakiecie z tkanin dwuosioowych i wynosiły ok. 10 MPa zarówno w badaniach numerycznych, jak i eksperymentalnych. Konsultacje medyczne wykazały, że większe wartości ciśnienia przy ochronie ciała pakietem balistycznym z tkanin dwuosioowych mogą prowadzić do perforacji ścian jelita oraz niewielkiej możliwości zapalenia otrzewnej. W wyniku ochrony ciała pakietem balistycznym z tkanin trójosiowych ryzyko wystąpienia perforacji jelit oraz zapalenia otrzewnej jest mniejsze.

8. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne efektywności balistycznej oraz ocena fizjologicznych skutków uderu balistycznego po niepenetrującym uderzeniu w osłonę balistyczną chroniącą ciało człowieka pozwoliły na udowodnienie tezy pracy, iż poprzez zastosowanie w pakietach balistycznych tkanin wieloosiowych zamiast tradycyjnie stosowanych tkanin dwuosiowych, istnieje możliwość minimalizacji fizjologicznych skutków uderu balistycznego przy zachowaniu porównywalnej masy osłony.

Biorąc pod uwagę wyniki przeprowadzonych badań numerycznych i eksperymentalnych, sformułowano następujące wnioski:

1. Numeryczna i eksperymentalna analiza efektywności balistycznej pakietów z tkanin dwuosiowych i trójosiowych, z zamocowanymi na stałe wszystkimi krawędziami, wykazała mniejszą liczbę warstw potrzebnych do ich nieprze-strzelenia dla pakietu składającego się z tkanin dwuosiowych w warunkach prowadzenia ostrzału pociskiem Parabellum 9 x 19 z prędkością uderzenia 406 m/s. **Minimalna liczba warstw w pakiecie z tkanin dwuosiowych wynosiła 16, natomiast dla pakietu z tkanin trójosiowych była równa 20.** Większa liczba warstw w pakiecie balistycznym z tkanin trójosiowych wynika prawdopodobnie z jej charakterystycznej ażurowości dla splotu bazowego. Z kolei analiza maksymalnej wysokości stożka odkształcenia wykazała, że znacznie mniejsze wartości występują w pakietach balistycznych składających się z tkanin trójosiowych w porównaniu z pakietami z tkanin dwuosiowych. W badaniach numerycznych **pakiet balistyczny składający się z 24 warstw tkanin trójosiowych osiągnął wartość maksymalnego stożka odkształcenia równą 3,00 cm, a dla pakietu z tkanin dwuosiowych o tej samej liczbie warstw wynosił 3,75 cm.** Natomiast w badaniach eksperymentalnych dla **24 warstw tkanin trójosiowych maksymalny stożek odkształcenia wynosił 3,80 cm, a dla pakietu z tkanin dwuosiowych był równy 5,00 cm.** Większe wartości maksymalnego stożka odkształcenia w badaniach eksperymentalnych wynikały z wysuwania się zakleszczonych warstw pakietu balistycznego z ram podczas ostrzału, co nie występowało w badaniach numerycznych.
2. Eksperymentalna analiza traumy balistycznej z użyciem bloku z plasteliny balistycznej Roma No. 1 wykazała, że mniejsze wartości maksymalnego stożka odkształcenia uzyskuje się dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. **Maksymalna wartość stożka dla pakietu balistycznego składającego się z 30 warstw tkanin trójosiowych była równa 2,9 cm, natomiast dla pakietu z tkanin dwuosiowych 3,8 cm.** Dodatkowo na podstawie oceny średnicy otworu na powierzchni bloku z plasteliny balistycznej wykazano, że jest ona większa przy zastosowaniu pakietu składającego się z tkanin trójosiowych. **Średnica otworu w podłożu balistycznym dla tego pakietu**

była w zakresie od 6,5 do 7,0 cm, natomiast dla pakietu składającego się z tkanin dwuosioowych od 5,0 do 6,0 cm.

3. W badaniach eksperymentalnych dotyczących analizy traumy balistycznej przy użyciu plasteliny balistycznej Roma No. 1 stwierdzono znaczną różnicę w kształcie stożków odkształcenia. **Kształt stożka w bloku plastelinowym po ostrzale pakietu balistycznego składającego się z 30 warstw tkanin trójosiowych był sferyczny z łagodnym zaokrągleniem**, natomiast po ostrzale pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych, kształt **stożka był zbliżony do ostrosłupa o szczególnym spiczastym zakończeniu w ostatniej fazie**. Biorąc pod uwagę kształty stożków w blokach plastelinowych stwierdzono, że potencjalne obrażenia w ciele człowieka mogą być mniejsze przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. Istnieje mniejsze ryzyko pojawienia się podbiegnięć krwawych i wybroczyn w mięśniu serca oraz mniejsze uszkodzenia żeber i płuc.
4. Eksperymentalna analiza traumy balistycznej z użyciem bloku z żelu balistycznego *Clear Ballistics* wykazała również, że mniejsze wartości maksymalnego stożka odkształcenia uzyskuje się dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. **Maksymalna wartość stożka dla pakietu balistycznego składającego się z 30 warstw tkanin trójosiowych była równa 4,2 cm, natomiast dla pakietu z tkanin dwuosioowych 5,0 cm**. Z kolei na podstawie oceny średnicy otworu na powierzchni bloku z żelu balistycznego *Clear Ballistics* wykazano, że jest ona większa przy zastosowaniu pakietu składającego się z tkanin trójosiowych. **Średnica otworu w podłożu z żelu balistycznego *Clear Ballistics* była w zakresie od 7,3 do 8,2 cm, natomiast dla pakietu składającego się z tkanin dwuosioowych od 6,1 do 6,9 cm**.
5. W badaniach eksperymentalnych dotyczących analizy traumy balistycznej przy użyciu żelu balistycznego *Clear Ballistics* stwierdzono, podobnie jak w badaniach z użyciem plasteliny, znaczną różnicę w kształcie stożków odkształcenia. **Kształt stożka w bloku z żelu balistycznego *Clear Ballistics* po ostrzale pakietu balistycznego składającego się z 30 warstw tkanin trójosiowych był sferyczny z łagodnym zaokrągleniem**, natomiast po ostrzale pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych, kształt **stożka był zbliżony do ostrosłupa o szczególnym spiczastym zakończeniu w ostatniej fazie**. Biorąc pod uwagę kształty stożków tworzących się w blokach z żelu balistycznego *Clear Ballistics* również stwierdzono, że potencjalne obrażenia w ciele człowieka mogą być mniejsze przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych.
6. **Eksperymentalna i numeryczna analiza uderzenia pocisku w model ciała człowieka wykazała, że ciśnienia wywierane na określone organy są zawsze mniejsze w przypadku ochrony ciała pakietem balistycznym złożonym z tkanin trójosiowych**. W badaniach numerycznych podczas uderzenia w mostek na linii położenia serca wartość ciśnienia przy ochronie modelu

ciała człowieka pakietem z tkanin trójosiowych wynosiła ok. 5,0 MPa, a w badaniach eksperymentalnych ok. 2,0 MPa. Natomiast podczas ochrony modelu ciała człowieka pakietem z tkaniny dwuosiowej w obliczeniach numerycznych ciśnienie wynosiło ok. 7,0 MPa, a w analizach eksperymentalnych ok. 4,0 MPa. Podczas uderzenia pocisku w międzyżebro na linii położenia płuc wartość ciśnienia przy ochronie modelu ciała człowieka pakietem z tkanin trójosiowych w badaniach numerycznych wynosiła ok. 1,5 MPa, a w badaniach eksperymentalnych ok. 1,0 MPa. Przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin dwuosiowych wartości ciśnień wynosiły odpowiednio ok. 2,5 MPa i ok. 1,5 MPa. Również podczas uderzenia pocisku w jamę brzuszną na linii położenia wątroby wartości ciśnienia były mniejsze przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. W badaniach numerycznych wartość ciśnienia na powierzchni wątroby wynosiła ok. 0,4 MPa, a w eksperymentalnych analizach ok. 0,38 MPa przy zastosowaniu na osłonę pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. Z kolei podczas ochrony ciała człowieka pakietem z tkanin dwuosiowych w badaniach numerycznych ciśnienie na powierzchni wątroby wynosiło ok. 0,8 MPa, a w badaniach eksperymentalnych ok. 0,5 MPa.

7. Eksperymentalna analiza fizjologicznych skutków udaru balistycznego podczas uderzenia pocisku w mostek na linii położenia serca wykazała ***pęknięcia mostka przy zastosowaniu zarówno pakietu z tkanin dwuosiowych, jak i trójosiowych***. Liczba pęknięć oraz obszar objęty uszkodzeniem mostka był jednak mniejszy przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych. ***Na podstawie wyników badań eksperymentalnych podczas uderzenia pocisku w żebro II przy ochronie modelu fizycznego ciała człowieka pakietem balistycznym z tkanin dwuosiowych stwierdzono pęknięcie żebra***. Tego typu obrażenia nie stwierdzono przy oględzinach modelu fizycznego ciała człowieka chronionego pakietem z tkanin trójosiowych.
8. Numeryczna analiza deformacji ciała człowieka podczas niepenetrującego ostrzału wykazała, że maksymalna głębokość deformacji ciała jest zawsze mniejsza podczas osłony pakietem balistycznym z tkanin trójosiowych. Przykładowo podczas ostrzału prowadzonego na linii serca ***dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych wynosiła ok. 0,68 cm, a dla pakietu balistycznego składającego się z tkanin dwuosiowej ok. 1,0 cm***. Z kolei podczas ostrzału prowadzonego na linii położenia wątroby ***dla pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych wynosiła ok. 2,25 cm, a dla pakietu balistycznego składającego się z tkanin dwuosiowych ok. 2,65 cm***. Te badania również pokazują, że potencjalne obrażenia w ciele człowieka mogą być mniejsze przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin trójosiowych.

Literatura

- [1] **Barauskas R., Abraitiene A., Vilkauskas A.:** 2005, *Simulation of a Ballistic Impact of a Deformable Bullet Upon a Multilayer Fabric Package*, WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol. 40, ISSN 1743-355X.
- [2] **Carroll A.W., Maj M.C., Soderstrom C.A.:** 1978, *A New Non-penetrating Ballistic Injury*, Annals of Surgery, Vol. 188(6), pp. 735-757.
- [3] **Ching T.W., Tan V.B.C.:** 2006, *Modelling Ballistic Impact on Woven Fabric with LS-Dyna*, Computational Methods, Springer, Printed in the Netherlands, pp. 1879-1884.
- [4] **Chu Ch.K., Chen Y.L.:** 2010, *Ballistic-proof Effects of Various Woven Constructions*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe, Vol. 18, No. 6 (83), pp. 63-67.
- [5] **Coupland R.M.:** 1999, *Clinical and Legal Significance of Fragmentation of Bullets in Relation to Size of Wounds: Retrospective Analysis*, British Medical Journal, Vol. 319, pp. 403-406.
- [6] **Datoc D.:** 2010, *Finite Element Analysis and Modeling of a .38 Lead Round Nose Ballistic Gelatin Test*, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, DOI: <https://doi.org/10.15368/theses.2010.44>.
- [7] **Dembek Z.F. i 24 redaktorów pomocniczych:** 2011, *Medical Magement of Biological Causalties Handbook*, US Army Medical Research Institute of Infectious Diseases, ISBN 978-0-16-090015-0.
- [8] **DiMaio V.J., DiMaio D.:** 2003, *Medycyna Sądowa*, Wydawnictwo Edra Urban & Partner Wrocław, ISBN 978-83-87944-59-9.
- [9] **Duan Y., Keefe M., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Powers B., Kirkwood J.E., Kirkwood K.M.:** 2005a, *Effects of Friction on the Ballistic Performance of a High-strength Fabric Structure*, WIT Transactions on Engineering Sciences, Vol. 49, ISSN 1743-3533.
- [10] **Duan Y., Keefe M., Wetzel E.D., Bogetti T.A., Powers B., Kirkwood J.E., Kirkwood K.M.:** 2005b, *Effects of Friction on the Ballistic Performance of a High-strength Fabric Structure*, International Conference on Impact Loading of Lightweight Structures Florianopolis, 8-12 May.
- [11] **Duan Y., Keefe M., Bogett T.A., Cheesemanc B.A.:** 2005c, *Modeling Friction Effects on the Ballistic Impact Behavior of a Single-ply High-strength Fabric*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 31, pp. 996-1012.
- [12] **Duan Y., Keefe M., Bogett T.A., Powers B.:** 2006, *Finite Element Modeling of Transverse Impact on a Ballistic Fabric*, International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 48, pp. 33-43.
- [13] **Dzieman A.J.:** 1960, *A Provisional Casualty Criteria for Fragments and Projectiles*, CWLR 239i, U.S. Army Chemical Warfare Laboratory.
- [14] **Fackler M.L., Bellamy R.F., Malinowski J.A.:** 1986, *Wound Mechanisms of Projectiles Striking at More than 1.5 km/s*, Journal of Trauma-Injury Infection & Critical Care, 26:250-4.
- [15] **Gomuc R.:** 2004, *Explicit Finite Element Modeling of Multilayer Composite Fabric for Gas Turbine Engine Containment System, PART 4: Model Simulation for Ballistic Tests, Engine Fan Blade-Out, and Generic Engine*, DOT/FAA/AR-04/40,P4, U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration.

- [16] **Harle J.W.S., Leech C.M., Adeyefa A., Cork C.R.:** 1981, *Ballistic Impact Resistance of Multi-Layer Textile Fabrics*, University of Manchester Institute of Science and Technology, Contract No. DAJA37-79-C-0532.
- [17] **Koperski W., Szmit Ł., Gawron A.:** 2011, *Badania Oddziaływania Pocisków o Różnej Konstrukcji na Ośrodki o Niskiej Gęstości Osłonięte Osłonami Balistycznymi*, Problemy Techniki Uzbrojenia, R. 40, z. 117.
- [18] **Lima M., Fangueiro R., Costa A., Rosiepen Ch., Rocha V.:** 2009, *Multiweave – A Prototype Weaving Machine for Multiaxial Technical Fabrics*, Indian Journal of Fibre & Textile Research, Vol. 34, pp. 59-63.
- [19] **Lim C.T., Shim V.P.W., Ng Y.H.:** 2003, *Finite Element Modeling of the Ballistic Impact of Fabric Armor*, International Journal of Impact Engineering, Vol. 28, pp. 13-31.
- [20] LS-Dyna, **KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME I**, 2007, Version 971, Livermore Software Technology Corporation.
- [21] LS-Dyna, **KEYWORD USER'S MANUAL VOLUME II**, Material Models, 2012, Version 971, Livermore Software Technology Corporation.
- [22] **Maréchal Ch., Bresson F., Haugou G.:** 2011, *Development of a Numerical Model of the 9mm Parabellum FMJ Bullet Including Jacket Failure*, Engineering Transactions, Vol. 59(4), pp. 263-272.
- [23] **Montanarelli N., Hawkins C., Shubin L.D.:** 1976, *Lightweight Body Armor for Law Enforcement Officers*, National Institute of Law Enforcement and Criminal Justice Law Enforcement Assistance Administration U.S. Department of Justice, NCJ 030462.
- [24] **Navarro C., Rodriguez J., Cortes R.:** 1994, *Analytical Modelling of Composite Panels Subjected to Impact Loading*, J. Phys. IV France, Vol. 04, pp. 515-520, DOI: 10.1051/jp4:1994880.
- [25] NIJ Standard 0101.04, 2001, *Ballistic Resistance of Personal Body Armor*, U.S. Department of Justice, Office of Justice Programs, National Institute of Justice.
- [26] NIJ Standard 0101.06, 2008, *Ballistic Resistance of Body Armor*, U.S. Department of Justice Office of Justice Programs, National Institute of Justice.
- [27] **Nilakantan G., Keefe M., Gillespie Jr. J.W.:** 2008, *Novel Mlti-scale Modeling of Woven Fabric Composites for use in Impact Studies*, 10th International LS-DYNA Users Conference, pp. 20-32.
- [28] **Nilakantan G., Keefe M., Bogetti T.A., Adkinson R., Gillespie Jr. J.W.:** 2010a, *On the finite element analysis of woven fabric impact using multiscale modeling techniques*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 47(17), pp. 2300-2315.
- [29] **Nilakantan G., Keefe M., Bogetti T.A., Gillespie Jr. J.W.:** 2010b, *Multiscale Modeling of the Impact of Textile Fabrics Based on Hybrid Element Analysis*, International Journal of Solids and Structures, Vol. 37(10), pp. 1056-1071.
- [30] **Pereira J.M., Revilock D.M.:** 2004, *Explicit Finite Element Modeling of Multi-layer Composite Fabric for Gas Turbine Engine Containment Systems*, Department of Transportation Federal Aviation Administration, PB2005-102471.
- [31] **Prather R., Swann C., Hawkins C.:** 1977, *Backface Signatures of Soft Body Armors and the Associated Trauma Effects*, ADA049463.
- [32] **Raftenberg M.N.:** 2003, *Response of the Wayne State Thorax Model with Fabric Vest to 9mm Bullet*, ARL-TR-2897, Army Research Laboratory, ADA409941.

- [33] **Raftenberg M.N.:** 2004, *Modeling Thoracic Blunt Trauma: Towards a Finite-Element (FE)-Based Design Methodology for Body Armor*, Army Research Laboratory, ADA433234.
- [34] **Rajan S.D., Mobasher B., Vaidya A.:** 2010, *LS-Dyna Implemented Multi-Layer Fabric Material Model Development for Engine Fragment Mitigation*, 11th International LS-Dyna Users Conference, pp. 47-58.
- [35] **Rao M.P., Duan Y., Keefe M., Powers B.M., Bogetti T.A.:** 2009, *Modeling the Effects of Yarn Material Properties and Friction on the Ballistic Impact of a Plain Weave Fabric*, *Composite Structures*, Vol. 89(4), pp. 556-566, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.11.012>.
- [36] **Roberts J.C., Biermann P.J., O'Connor J.V., Ward E.E., Cain R.P., Carkhuff B.G., Merkle A.C.:** 2005, *Modeling Nonpenetrating Ballistic Impact on a Human Torso*, *JOHNS HOPKINS APL TECHNICAL DIGEST*, Vol. 26, No. 1.
- [37] **Roberts J.C., Merkle A.C., Biermann P.J., Ward E.E., Carkhuff B.G., Cain R.P., O'Connor J.V.:** 2007, *Computational and Experimental Models of the Human Torso for Non-penetrating Ballistic Impact*, *Journal of Biomechanics*, Vol. 40, pp. 125-136.
- [38] **Roylance D.K., Wang S.S.:** 1979, *Penetration Mechanics of Textile Structures, Technical Report Contract No. Daag 17-76-C-0013*, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, ADA089445.
- [39] **Roylance D.K., Wang S.S.:** 1980, *Stress Wave Propagation in Fibers: Effect of Cross-overs*, *Fiber Science and Technology*, Vol. 13(5), pp. 385-395.
- [40] **Shen W., Niu Y., Bykanova L., Laurence P., Link N.:** 2010, *Characterizing the Interaction Among Bullet, Body Armor, and Human and Surrogate Targets*, *Journal of Biomechanical Engineering*, Vol. 132(12), DOI:10.1115/1.4002699.
- [41] **Simons J.W., Erlich D.C., Shockey D.A.:** 2001, *Finite Element Design Model for Ballistic Response of Woven Fabrics*, *Proceedings of the 19th international symposium on ballistics*, pp. 1415-22.
- [42] **Stewart F.H.:** 1921, *Woven Fabric*, United States Patent Office, No. 1368215.
- [43] **Tan V.B.C., Zeng X.S., Shim V.P.W.:** 2008, *Characterization and Constitutive Modeling of Aramid Fibers at High Strain Rates*, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 35(11), pp. 1303-1313, <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2007.07.010>
- [44] **Utracki L.A.:** 2010, *Rigid ballistic composites (Review of literature)*, NRC Publications Archive Archives des publications du CNRC, <http://doi.org/10.4224/16885314>
- [45] **Vinson J.R., Zukas J.A.:** 1975, *On the Ballistic Impact of Textile Body Armor*, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 42(2), pp. 263-268, DOI:10.1115/1.3423564.
- [46] **Wang K.H.-C.:** 1995, *Development of a Side Impact Finite Element Human Thoracic Model*, Ph.D. Thesis, Wayne State University, Detroit.
- [47] **Wilde A., Roylance D., Rogers J.:** 1973, *Photographic Investigation of High-Speed Missile Impact upon Nylon Fabric Part I: Energy Absorption and Cone Radial Velocity in Fabric*, *Textile Research Journal*, Vol. 43(12), pp. 753-761.
- [48] **Zhu D., Vaidya A., Mobasher B., Rajan S.D.:** 2014, *Finite Element Modeling of Ballistic Impact on Multi-layer Kevlar 49 Fabrics*, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 56, pp. 254-262, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.051>.
- [49] **Zieliński K.W., Brocki M., Janiak M.K., Wiśniewski A.:** 2010, *Patologia Obrażeń i Schorzeń Wywołanych Współczesną Bronią w Działaniach Wojennych i Terrorystycznych*, Ministerstwo Obrony Narodowej, Warszawa, ISBN: 978-83-927103-4-9.

MODELING MULTI-LAYER BALLISTIC PROTECTIONS MINIMIZING THE EFFECTS OF A STROKE

Summary

Soft ballistic packages are the main element of ballistic shields and are a vital protective layer protecting against fire from the firearms. Multilayer soft ballistic packages used in bulletproof vests provide protection against loss of health or even save lives of representatives of the social groups whose job is to ensure the lasting national security, maintain public order in the country and provide a sense of physical safety and security of property of the citizens. All representatives of these groups deserve the specialized and most innovative personal protection.

The main aim of the foregoing doctoral thesis was to obtain an optimal textile structure of a ballistic shield minimizing the physiological effects of an impact. The thesis looks closer at the triaxial and biaxial structures adopting the two-step research methodology: numerical analysis, using Finite Element Method (FEM), and experimental verification in Ballistic Research Laboratory. First of all, numerical research – hitting 9x19 mm Parabellum FMJ bullet into the multilayered ballistic package was performed. This part resulted in the numerical analysis of the conception of replacing the fabric-structured 3D object by the homogenized 2D shell using different material models. The results of numerical research were verified experimentally in the ballistic tunnel. Packages consisted of 6, 12, 16, 18, 20, 22, 24, 30 layers of biaxial and triaxial KEVLAR 29 fabric. On the basis of the complete research results, it was found that the proposed conception of replacing the biaxial and triaxial fabric layer by the 2D shell will fully realize the established research plan. Particularly it was proved, that through the use of different material models for the researched textile structures it is possible to obtain similar ballistic effectiveness as in the case of real textile ballistic packages.

In its further part the following paper describes the methodology of the research of soft ballistic packages using standard Roma No.1 substrate in accordance with the NIJ Standard 0101.06 and the proposed substrate Clear Ballistics Gel with characteristics similar to the tissues of the human body. There were significant differences in the maximum deformation cone for the package of 30 layers of woven biaxial and triaxial KEVLAR 29, depending on the ballistic substrate applied. The vast difference in the volume of deformation of the package depending on the ballistic substrate illustrates the problem of the currently used not updated research methodology of personal protection. The use of ballistic gel as a professional ballistic substrate is reliably closer to the real conditions in which vests are used. Based on the results, it was found that if diversified ballistic substrate was applied there is a tendency for the triaxial fabric ballistic package to achieve less than the maximum deformation cone. The value is low compared to the biaxial fabric package as a result of the influence of the isotropic properties of the fabric. Medical consultations of the analyzed research problem allowed to state that the assessment of the potential effects of a ballistic trauma depends primarily on defining the anatomic location of the bullet hits. Depending on where the deformation takes place in may result in breaking of ribs, lung contusion, pleural parenchyma and in extreme cases can lead to pneumothorax or bleeding into the pleural cavity. For the package with

lower deformation values the scale of internal injuries is reduced and may lead to health changes only.

The last stage of the research was to determine the scale of physiological effects of a stroke during non-penetrative bullet hitting in ballistic shield. For this purpose, numerical research was conducted using the discrete model in the form of "human body – a package of ballistic – projectile" It was also a challenge to make a physical model of the human body having the most important internal organs: heart and lungs. As a result of numerical analysis and experiments, it was found that the structure of the triaxial textile enables to minimize the maximum deformation cone, and consequently reduces the physiological effects of the stroke. The ballistic package of the biaxial fabric, which is an anisotropic material, significant damage in the place of direct impact in the shock wave was observed. On the other hand, the ballistic package made of triaxial fabric shows the influence of isotropic properties meaning that the deformation may be spread over a larger area ensuring less serious deformation of the internal organs. On the basis of medical opinion it was concluded that the triaxial fabric ballistic package can minimize the occurrence of rupture of liver capsule and the emergence subcapsular hematoma and there is little likelihood of intestine or colon perforation. In the case of the analysis of the damage to the thoracic cavity it has been found that the multiaxial fabric package will help to minimize the occurrence of pneumothorax and the occurrence of the extensive hemorrhage of the lung along the ribs.