



POLITECHNIKA ŁÓDZKA

Rozprawa doktorska

**Numeryczne i eksperymentalne podejście
do problemu konstrukcji tekstylnych
osłon balistycznych ze strukturą
haftowaną**

Mgr inż. Maciej Gloger

Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska

Praca doktorska wykonana na Wydziale Technologii Materiałowych
i Wzornictwa Tekstyliów w Instytucie Architektury Tekstyliów

Łódź 2023

Składam serdeczne podziękowania Promotorowi pracy dr hab. inż. Zbigniewowi Stempniowi – prof. uczelni i promotorowi pomocniczemu dr inż. Justynie Pinkos z Instytutu Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej za zaufanie, nieocenioną pomoc w trakcie przygotowywania rozprawy doktorskiej, cierpliwość, wyrozumiałość i cenne wskazówki w ciągu przebiegu całych studiów doktoranckich.

Pragnę podziękować też wszystkim pracownikom z Instytutu Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej za życzliwość, która spotykała mnie na każdym kroku i okazaną pomoc.

Chciałem również podziękować rodzinie i przyjaciołom za ciągłą motywację i wsparcie w dążeniu do celu.

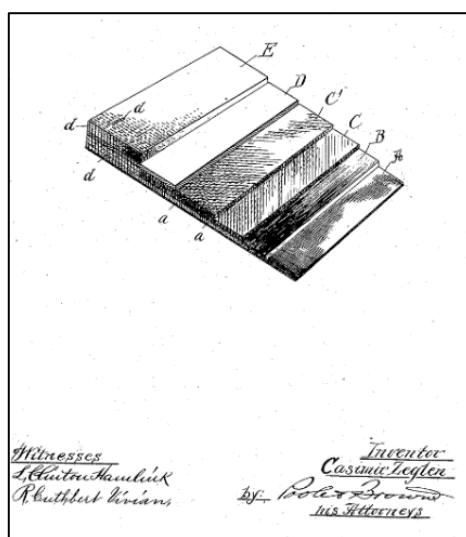
Spis treści

1. WSTĘP	4
2. AKTUALNY STAN WIEDZY I PROBLEMATYKA BADAŃ	7
2.1. Rodzaje włókien stosowanych w balistyce	7
2.2. Strukturalna barierowość balistyczna tekstyliów	11
2.2.1. Odpowiedź nitki na uderzenie pocisku.....	11
2.2.2. Odpowiedź tkaniny na uderzenie pocisku	13
2.2.3. Struktury tekstylne stosowane w miękkich osłonach balistycznych.....	15
2.2.3.1. Tkaniny jako warstwy pakietów balistycznych.....	15
2.2.3.2. Struktury nietkane UD	34
2.2.3.3. Tkaniny wieloosiowe w balistyce.....	38
2.3. Wpływ struktury pakietu na efektywność balistyczną osłony.....	41
2.3.1. Układy hybrydowe pakietów balistycznych.....	41
2.3.2. Przeszywane pakiety balistyczne	53
2.4. Podsumowanie przeglądu literatury	55
3. CEL I TEZA PRACY	56
4. METODYKA BADAŃ NUMERYCZNYCH I EKSPERYMENTALNYCH	57
4.1. Założenia wstępne do badań numerycznych i eksperymentalnych	57
4.2. Wytwarzanie struktur haftowanych.....	58
4.3. Metodyka badań numerycznych	61
4.4. Metodyka badań eksperymentalnych	69
5. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH I EKSPERYMENTALNYCH.....	76
5.1. Badania efektywności balistycznej pakietów mocowanych w stalowych ramach.....	76
5.1.1. Wyznaczenie wartości parametrów <i>NFLS</i> i <i>SFLS</i>	76
5.1.2. Badania numeryczne i eksperymentalne pakietów balistycznych w zależności od wariantu ułożenia warstw	77
5.2. Pakiety osadzone na podłożu plastelinowym	97
5.3. Optymalizacja pakietu balistycznego wykonanego w Wariancie IV	104
6. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ	109
7. WNIOSKI KOŃCOWE	114
8. LITERATURA	116

1. WSTĘP

Tekstylne osłony balistyczne do których zalicza się kamizelki kuloodporne są powszechnie używane przez personel wojskowy, organy ścigania, a także przez osoby cywilne wykonujące zawody wysokiego ryzyka, takie jak personel ochrony lub osoby udzielające pierwszej pomocy. Kamizelki kuloodporne są dostępne w różnych kształtach i rozmiarach, od kamizelek zakrywających tułów po kurtki, spodnie, a nawet koszule, które zapewniają pokrycie całego ciała [1]. Głównym zadaniem kamizelki kuloodpornej jest spełnienie dwóch kryteriów bezpieczeństwa – nieprzestrzelenie pakietu oraz minimalizacja skutków uderzenia balistycznego [2]. Zjawisko uderzenia pocisku w miękki pakiet balistyczny jest bardzo złożonym procesem, który może zależeć m.in. od liczby warstw w miękkim pakiecie balistycznym, parametrów wytrzymałościowych włókien oraz typu pocisku jego prędkości i energii uderzania. Absorpcja energii kinetycznej pocisku oraz jej rozkład w poszczególnych warstwach pakietu balistycznego zależy m.in. od struktury geometrycznej zastosowanych tekstyliów [3].

Historycznie ewolucja kamizelki kuloodpornej ma bezpośredni związek ze wzrostem energii uderzenia pocisków wystrzeliwanych z broni palnej. Rozwój pocisków o coraz to większych prędkościach uderzenia wymuszał konieczność poszukiwania nowych materiałów o coraz to lepszych parametrach wytrzymałościowych. Pod koniec XIX wieku opracowana została pierwsza wielowarstwowa miękka kamizelka kuloodporna, której autorem był Kazimierz Żegleń (Rys. 1) [4]. Wielowarstwowy pakiet wykonany na bazie materiałów włókienniczych pozwalał na ochronę ciała przed pociskami wystrzeliwanymi z rewolwerów i strzelb małokalibrowych. W szczególności pakiet ten składał się z gęsto tkanej płóciennej tkaniny lnianej z dodatkiem sierści zwierzęcej i wielu warstw jedwabiu. Całość wzmocniona była grubą warstwą prasowanego filcu, a także impregnowana substancją o nieznanym składzie, którego Żegleń nie chciał ujawnić nawet we wniosku patentowym.



Rys. 1. Widok wielowarstwowego pakietu balistycznego zaproponowanego przez Kazimierza Żeglenia [4]

Za największy przełom w rozwoju miękkich osłon balistycznych uznaje się opracowanie w roku 1965 technologii otrzymywania włókien para-aramidowych w laboratoriach firmy DuPont (USA) przez Stephanie Kwolek [5]. Włókna te znane są pod nazwą handlową Kevlar®. Inny sposób otrzymywania włókien para-aramidowych opracowała firma Teijin Aramid (Holandia), które znane są pod nazwą handlową Twaron®. W dalszych latach włókna para-aramidowe ulegały modyfikacjom w celu uzyskania lepszej efektywności balistycznej i są stosowane do dzisiaj [6]. Ogromnym osiągnięciem w rozwoju miękkich pakietów balistycznych było opracowanie technologii włókien polietylenowych UHMWPE (Ultra-High Molecular Weight Polyethylene) przez holenderską firmę DSM [7], znane pod nazwą handlową Dyneema®, oraz amerykańską firmę Honeywell, znane pod nazwą handlową Spectra Shield®.

Należy stwierdzić, że skuteczność ochronna miękkich kamizelek kuloodpornych zależy nie tylko od przyjętego materiału włókien, ale także od różnych parametrów strukturalnych pakietów balistycznych, takich jak: rodzaj konstrukcji warstwy tekstylnej (tkanina dwuosiowa i trójosiowa, włóknina, dzianina 2D/3D), masa liniowa i liczności nitek, masa powierzchniowa warstw, liczba warstw w pakiecie balistycznym, hybrydowa orientacja warstw w pakiecie balistycznym, napawanie warstw substancjami z udziałem mikro- i nanocząstek różnych materiałów, które stosowane w różnych kombinacjach prowadzą do uzyskania odpowiedzi strukturalnej, sprzyjającej zwiększonej efektywności balistycznej kamizelek kuloodpornych [3]. Tkanina o splocie płóciennym 2D jest najprostszą i najczęściej stosowaną konstrukcją w zastosowaniach balistycznych. Powstaje w procesie tkania poprzez przeplatanie nitek wątku i osnowy. W celu wytworzenia pakietów balistycznych tkaniny układane są wielowarstwowo, przy czym liczba warstw dobierana jest tak, aby zapewnić wymaganą normami efektywność balistyczną kamizelki w projektowanej klasie kuloodporności. Struktury wielowarstwowe łączy się ze sobą poprzez przszycia, np. punktowe lub w kształcie rombu. Laminaty jednokierunkowe UD to kolejna struktura 2D, która znajduje zastosowanie w miękkich kamizelkach kuloodpornych [8]. Struktury te składają się przynajmniej z dwóch arkuszy rozprostowanych włókien, ułożonych względem siebie pod kątem 90°. Arkusze te są wytwarzane przez preimpregnację włókien żywicą lub gumą np. poliizoprenową. Dwie zewnętrzne strony laminatu pokrywa się folią, np. poliuretanową, która zabezpiecza włókna przed niszczącymi skutkami tarcia i brudem. Elastyczność w tych strukturach jest zachowana ze względu na niską zawartość żywicy, która zwykle wynosi do 20%. Z uwagi na inną konstrukcję struktur UD w porównaniu z tkaninami, ich odpowiedź balistyczna jest inna niż tkanin. W tkaninach ze względu na istnienie przepłotów nitek, włókna nie są rozciągane wzdłuż ich osi, dopóki przędza nie zostanie rozprostowana. To znacznie zmniejsza prędkość propagacji fali podłużnej, która zależna jest też od splotu tkaniny, i wpływa na obszar wyrobu absorbującego energię kinetyczną pocisku. W przypadku struktur UD posiadają one rozprostowany profil włókien,

w związku z tym fala podłużna przemieszcza się szybciej niż w tkaninach i większy obszar wyrobu może uczestniczyć w rozpraszaniu energii.

Interesującą propozycją w rozwoju miękkich kamizelek kuloodpornych są konstrukcje hybrydowe pakietów balistycznych, zawierających hybrydowy układ warstw. Zasadniczo każdy rodzaj struktury tekstylnej stosowanej w warstwach pakietów balistycznych wykazuje się korzystnymi i niekorzystnymi właściwościami z punktu widzenia odpowiedzi balistycznej. W hybrydowych konstrukcjach pakietów można, poprzez odpowiednie uszeregowanie warstw, ograniczyć wpływ niekorzystnych właściwości struktur na odpowiedź balistyczną i tym samym zwiększyć efektywność balistyczną pakietu.

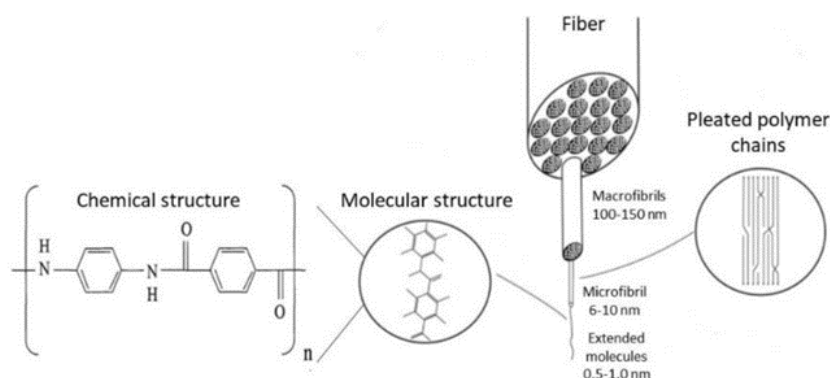
Interesującym kierunkiem rozwoju bardziej efektywnych tekstylnych pakietów balistycznych jest zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych, również w układach hybrydowych z tkaninami. Takie struktury nie były do tej pory rozważane jako warstwy pakietów balistycznych. Do wytworzenia struktur haftowanych dostępna jest technologia Tailored Fibre Placement (TFP), która daje możliwość tworzenia struktur dwu- i wielowymiarowych, poprzez układanie i przyhaftowywanie nicią mocującą do podłoża, przędzy o dowolnie zaprojektowanej orientacji. Konieczne jest jednak przeprowadzenie badań numerycznych wspartych badaniami eksperymentalnymi w celu lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny zawierający takie struktury. Z tego względu celem badań prezentowanych w pracy była ocena efektywności balistycznej, poznanie mechanizmów niszczących oraz optymalizacja pakietów złożonych z para-aramidowych struktur haftowanych i tkanin za pomocą modelowania numerycznego metodą elementów skończonych i badań eksperymentalnych.

2. AKTUALNY STAN WIEDZY I PROBLEMATYKA BADAŃ

2.1. Rodzaje włókien stosowanych w balistyce

Powszechnie stosowanymi materiałami wykorzystywanymi na miękkie pakiety balistyczne są wysokowytrzymałe włókna para-aramidowe o nazwach handlowych Kevlar® i Twaron®, polietylenowe (HPPE) dostępne komercyjnie pod nazwami Spectra® i Dyneema® oraz włókna PBO występujące pod nazwą Zylon®. Włókna te charakteryzują się przede wszystkim małą gęstością, wysoką wytrzymałością na rozciąganie i wysoką zdolnością absorbowania energii kinetycznej pocisku.

Włókna para-aramidowe składają się z liniowych, regularnych i sztywnych łańcuchów polimerowych z pierścieniami aromatycznymi o wysoce uporządkowanej strukturze (Rys. 2) [9–12]. Łańcuchy polimerowe łączą silne wiązania kowalencyjne tworząc wysoce zorientowane makrocząsteczki, składające się na strukturę włókna para-aramidowego. Tak uporządkowana struktura odpowiada za doskonałe właściwości mechaniczne włókna, takie jak wysoka wytrzymałość na rozciąganie i wysoki moduł sprężystości. Należy zaznaczyć, że w strukturze makrocząsteczkowej para-aramidu nie występują silne wiązania kowalencyjne prostopadłe do łańcuchów polimeru. Są one połączone ze sobą słabymi wiązaniami wodorowymi i/lub siłami van der Waalsa co powoduje, że włókno łatwo ulega fibrylacji podczas ścierania.

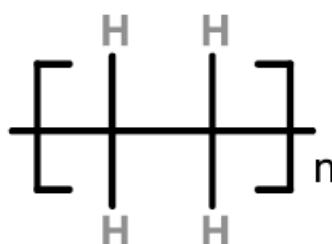


Rys. 2. Struktura chemiczna i makromolekularna włókna para-aramidowego [12]

Łańcuchy makrocząsteczkowe charakteryzujące się wysokim stopniem orientacji i silnymi wiązaniami międzyłańcuchowymi, dają w rezultacie połączenie unikalnych właściwości włókna związanych z własnościami lepkosprężystymi. Odpowiadają za to wiązania wodorowe oraz związane z własnościami sprężystymi, za które odpowiadają silne wiązania kowalencyjne. Taki układ własności reologicznych pozwala na absorpcję olbrzymiej energii w procesie rozrywania wyrobów włókienniczych wykonanych z włókien para-aramidowych [12]. Ich przydatność w wielu zastosowaniach jest związana z bardzo wysoką wytrzymałością na rozciąganie i ściskanie, wynikającej ze specyficznej budowy chemicznej tworzywa. Wytrzymałość właściwa pojedynczych włókien przekracza 200 cN/tex a wytrzymałość termiczna jest powyżej 500°C. Włókna obok wysokiej stabilności

termicznej wykazują również dobrą odporność na działanie wielu zasad i kwasów oraz cechują się niskim skurczem w gorącej wodzie i w podwyższonej temperaturze [13]. Wadą włókien para-aramidowych jest ich degradacja pod wpływem promieniowania UV, która prowadzi do pogorszenia własności wytrzymałościowych wyrobów wykonanych z tych włókien [14].

Tekstylne struktury przeznaczone na osłony balistyczne wykonuje się powszechnie również z włókien z polietylenu o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE). Materiał ten znany jest również jako polietylen o wysokim module (HMPE) lub polietylen o wysokiej wydajności (HPPE). Wysoko wytrzymały polietylen składa się z bardzo długich łańcuchów a masa molowa tego polietylenu wynosi od 3 do 10 milionów g/mol. Na rys. 3 przedstawiono strukturę chemiczną polietylenu UHMWPE [15].

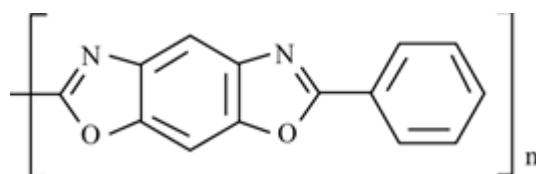


Rys. 3. Struktura chemiczna polietylenu UHMWPE [15]

Włókna z polietylenu UHMWPE wytwarzane są poprzez wytlaczanie żelu przedziałniczego i ciągnięcie [16-21]. Proces ten przebiega wieloetapowo. W pierwszym etapie wielkocząsteczkowy polietylen jest rozpuszczany najczęściej w oleju parafinowym z dodatkiem przeciwutleniaczy w temperaturze ok. 135°C. Zależnie od wytwarzanego włókna, tworzy się mieszaninę o zawartości od 1.5 do 5% wagowych PE. W drugim etapie podawana jest do cylindra wytłaczającego i po ogrzaniu do temperatury 190°C włókna są wytłaczane przez filierę. Wytłaczane włókna są chłodzone powietrzem i przechodzą przez kąpiel chemiczną w n-heksanie w celu usunięcia pozostałego we włóknach rozpuszczalnika i suszone. W ostatnim etapie włókna są rozciągane w wysokiej temperaturze 148°C przechodząc przez układ bębnow rozciągających, co powoduje zmniejszenie ich średnicy i przebudowę struktury. Podczas rozciągania struktura włókna zmienia się ze struktury lamelarno – fibrylarniej w strukturę fibrylarną, gdzie łańcuchy polimeru zostają rozciągnięte i ułożone równoległe względem siebie tworząc fazę krystaliczną. To przekształcenie i uporządkowanie struktury decyduje o własnościach wytrzymałościowych włókna. Proces produkcji włókien UHMWPE jest skomplikowany i wieloetapowy a procesem decydującym o wytrzymałości włókna jest jego rozciąganie w wysokiej temperaturze. Przeprowadzone badania wykazały, że do pewnego poziomu wytrzymałość włókna rośnie wraz ze wzrostem prędkości rozciągania. Z kolei powyżej określonej prędkości rozciągania wytrzymałość włókien nie zwiększa się [22-24]. Włókna polietylenowe UHMWPE charakteryzują się bardzo dużą wytrzymałością na rozciąganie rzędu 2-3 GPa i bardzo wysokim modulem

sprężystości od 50 do 175 GPa [25-29]. Gęstość właściwa włókien polietylenowych UHMWPE wynosi 0.97 g/cm³. Istotną zaletą tych włókien jest odporność na działanie szerokiego spektrum substancji chemicznych, m.in. na większość kwasów i zasad. Bardzo ważną cechą tych włókien jest odporność na działanie światła słonecznego i promieniowania UV, co daje dużą przewagę włókien UHMWPE nad włóknami para-aramidowymi, które są wrażliwe na działanie promieniowania UV [14]. Ograniczeniem w szerokich zastosowaniach polietylenu UHMWPE jest stosunkowo niska temperatura topnienia, która wynosi 144 - 152°C. Umożliwia to stosowanie tych włókien w temperaturze wyższej niż 100°C przez długi czas użytkowania wyrobu [30].

Trzecim rodzajem włókien stosowanych komercyjnie w tekstylnych strukturach przeznaczonych na osłony balistyczne są włókna z poli(p-fenylene-2,6-benzobisoksazolu) (PBO), znane pod nazwą handlową Zylon®. Strukturę chemiczną tego włókna przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Struktura chemiczna włókna Zylon® [31]

Zawiera ono sztywne łańcuchy poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole). Włókna Zylon posiadają znacznie większą wytrzymałość na rozciąganie i ścinanie oraz większy moduł Younga w porównaniu z włóknami para-aramidowymi i polietylenowymi UHMWPE [31]. Charakteryzują się wysoką stabilnością termiczną, jeszcze większą niż włókna para-aramidowe, gdzie ulegają one rozkładowi w temperaturach powyżej 650°C [32-33]. Włókna PBO cechują się mniejszą fibrylacją w porównaniu z włóknami para-aramidowymi, tym samym cechują się doskonałą odpornością na ścieranie. Podobnie jak włókna para-aramidowe i polietylenowe UHMWPE wykazują bardzo dobrą odporność na różne czynniki chemiczne i stabilność wymiarów w kontakcie z wilgocią, gdzie ich współczynnik pochłaniania wilgoci jest na poziomie 0.6% [34-35]. Wadą włókien PBO jest bardzo duża wrażliwość na działanie promieniowania UV i światła widzialnego do tego stopnia, że nawet nawijanie włókien na bębny podczas procesu wytwarzania musi odbywać się w ciemności. Z kolei ekspozycja włókien PBO na promieniowanie UV prowadzi do ich degradacji i pogorszenia własności wytrzymałościowych [36-37]. Z tego powodu produkty z włóknami PBO Zylon wymagają zabezpieczenia przed promieniowaniem UV za pomocą barierowych materiałów. Pomimo doskonałych parametrów wytrzymałościowych włókien Zylon, ich szerokie zastosowanie w pakietach balistycznych kamizelek kuloodpornych ogranicza bardzo wysoka cena.

W tabeli 1 zestawiono parametry wytrzymałościowe włókien wysokomodulowych stosowanych obecnie w tekstylnych osłonach balistycznych. Jak widać w tabeli 1, włókna stosowane w tekstylnych osłonach balistycznych cechują się przede wszystkim wysokim modułem Younga, który w zależności od generacji dla włókien para-aramidowych wynosi od 70 do 113 GPa, dla włókien polietylenowych UHWPE od 73 do 124 GPa a dla włókien PBO od 180 do 270 GPa. Parametrami istotnymi z punktu widzenia zastosowań w osłonach balistycznych jest wytrzymałość na rozciąganie i wydłużenie zrywające włókien. Wytrzymałość na rozciąganie dla włókien para-aramidowych i polietylenowych UHWPE oscyluje w zakresie od 2.9 do 3.4 GPa a dla włókien PBO wynosi 5.8 GPa. Z kolei wydłużenie zrywające dla wszystkich wysokomodulowych włókien stosowanych w balistyce zawiera się w wąskim przedziale od 2.6 do 4.2%.

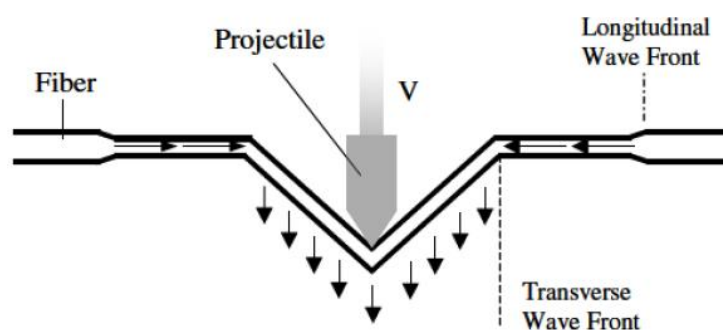
Tabela 1. Zestawienie włókien wraz z ich parametrami wytrzymałościowymi stosowanych obecnie w tekstylnych osłonach balistycznych

Rodzaj włókna	Nazwa handlowa	Gęstość	Moduł sprężystości	Wytrzymałość na rozciąganie	Wydłużenie zrywające	Prędkość fali naprężeń
		g/cm ³	GPa	MPa	%	m/s
Włókna aramidowe	Kevlar 29	1.44	70	2965	4.2	7000
	Kevlar 129	1.44	96	3390	3.5	8200
	Kevlar 49	1.44	113	2965	2.6	8900
	Kevlar KM2	1.44	70	3300	4.0	7000
	Twaron CT	1.45	85	3330	3.5	7700
	Twaron CT Microfilament	1.45	102	3400	3.5	8400
Włókna polietylenowe UHWPE	Spectra 900	0.97	73	2400	2.8	8700
	Spectra 1000	0.97	103	2830	2.8	10300
	Spectra 2000	0.97	124	3340	3.0	11300
	Dyneema SK60	0.97	89	2700	3.5	9580
	Dyneema SK65	0.97	95	3000	3.6	9900
	Dyneema SK66	0.97	99	3200	3.7	10100
Włókna PBO	Zylon AS	1.54	180	5800	3.5	10800
	Zylon HM	1.56	270	5800	2.5	13200

2.2. Strukturalna barierowość balistyczna tekstyliów

2.2.1. Odpowiedź nitki na uderzenie pocisku

Podczas poprzecznego uderzenia pocisku lecącego z określoną prędkością powstają dwie fale poprzeczna i podłużna (Rys. 5). Fala podłużna jest związana z rozprzestrzenianiem się naprężeń wzdłuż nitki, powodując przemieszczanie się przekrojów poprzecznych nitek w kierunku środka uderzenia pocisku. Natomiast w przypadku generowania fali poprzecznej, przekroje poprzeczne nitek przemieszczają się w kierunku toru lotu pocisku. Fundamentalne prace teoretyczne i eksperymentalne dotyczące zjawisk zachodzących podczas poprzecznego uderzenia pocisku w nitkę powstały w zespole Smitha w połowie ubiegłego wieku [38-46].



Rys. 5. Powstawanie falki poprzecznej i podłużnej podczas poprzecznego uderzenia pocisku w nitkę [47]

Prędkość propagacji fali naprężeń wzdłużnych c dana jest zależnością (1):

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

gdzie:

E - Moduł Younga,

ρ - gęstość nitki.

W przypadku fali poprzecznej powstającej podczas uderzenia pocisku z prędkością v , przekroje poprzeczne nitki przemieszczają się tylko w kierunku toru lotu pocisku. Prędkość czoła fali poprzecznej sformułowano według zależności (2):

$$u = \sqrt{\frac{\sigma}{1+\varepsilon}} \quad (2)$$

gdzie:

σ - naprężenie w nitce,

ε - odkształcenie nitki.

Przyjmując uproszczenia w postaci stałej prędkości pocisku, sprężystych własności nitki jak również punktowego uderzenia pocisku, formułuje się zależności pomiędzy odkształceniem nitki a prędkościami fali podłużnej i poprzecznej oraz prędkością pocisku (3), (4):

$$u = c \cdot \left(\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon \right) \quad (3)$$

$$v = c \cdot \left(\sqrt{2\varepsilon\sqrt{\varepsilon(1+\varepsilon)} - \varepsilon} \right) \quad (4)$$

Z kolei energię kinetyczną związaną z przemieszczaniem przekrojów poprzecznych w obszarze fali poprzecznej formułuje zgodnie z zależnością (5):

$$E_k = A_n t \varepsilon^2 \sqrt{\frac{E^3}{\rho}} \left(3 - 2 \sqrt{\frac{\varepsilon}{1+\varepsilon}} \right) \quad (5)$$

gdzie:

- A_n - pole przekroju poprzecznego nitki,
- t - czas po uderzeniu pocisku.

Energię odkształcenia można natomiast obliczyć z zależności (6):

$$E_s = A_n t \varepsilon^2 \sqrt{\frac{E^3}{\rho}} \quad (6)$$

Dalsze prace nad poprzecznym uderzeniem pocisku w nitkę dotyczyły badań eksperymentalnych efektywności balistycznej nitek para-aramidowych i polietylenowych UHWPE po uderzeniu poprzecznym kulki stalowej o masie 0.68 g i prędkości zmieniającej się w zakresie 346-720 m/s [48]. Odkształcenie nitek rejestrowano kamerą do szybkiej rejestracji. Efektywność balistyczna jako ilość absorbowanej energii kinetycznej pocisku mierzono poprzez pomiar jego prędkości uderzenia i prędkości po przebicium nitki. Analizowano mechanizm niszczenia nitki poprzez obserwacje zerwanych końców pod mikroskopem. Badania pokazały, że nitki para-aramidowe i polietylenowe UHMWPE zawsze zrywają się w punkcie uderzenia pocisku. Mechanizm zrywania nitki wynika z generowania fali naprężeń oraz pękaniem nitki w wyniku naprężeń ścinających.

W roku 1999 opublikowano badania Cunniffa według których, klasyfikuje się nitki z punktu widzenia efektywności balistycznej [49]. Wcześniejsze badania pokazały, że z punktu widzenia efektywności balistycznej nitek, prędkość propagacji fali naprężeń c wyrażona zależnością (1) oraz jednostkowa wytrzymałość nitki T wyrażona zależnością (7) powinny być jak największe:

$$T = \frac{\sigma\varepsilon}{2} \quad (7)$$

Z uwagi na to, że analiza obu wielkości c i T nie dawała jednoznacznej oceny, Cunniff zaproponował bezwymiarowy wskaźnik efektywności balistycznej nitki, uwzględniający obie te wielkości o następującej zależności:

$$U^* = \frac{\sigma\varepsilon}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

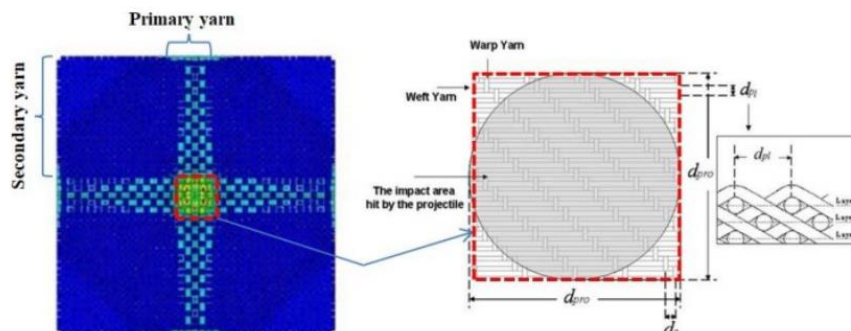
Zgodnie z tą zależnością, im większa jest obliczona wartość wskaźnika U^* dla danej nitki, tym większa jest jej efektywność balistyczna. Bardzo często wskaźnik U^* jest przeliczany zgodnie z zależnością (9):

$$U = (U^*)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{\sigma\varepsilon}{2\rho} \sqrt{\frac{E}{\rho}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

Jednostką tego wskaźnika jest m/s i bardzo często wskaźnik ten jest nazywany wskaźnikiem Cunniffa. Podobnie jak dla wskaźnika U^* , im większa jest prędkość Cunniffa U , tym efektywność balistyczna nitki jest większa. W zależności od generacji rozwoju włókien stosowanych typowo w tekstylnych osłonach balistycznych, prędkość Cunniffa dla włókien para-aramidowych wynosi od 670 do 700 m/s, dla włókien polietylenowych HPPE od 670 do 840 m/s a dla włókien PBO od 850 do 890 m/s.

2.2.2. Odpowiedź tkaniny na uderzenie pocisku

Tradycyjnymi tkaninami stosowanymi na osłony balistyczne są zwykle tkaniny o splocie płóciennym [50-52]. Podczas uderzenia pocisku w pojedynczą warstwę tkaniny, energia kinetyczna pocisku jest absorbowana głównie przez nitki osnowy i wątku kontaktujące się z czołem pocisku (Rys. 6) [53]. Nitki osnowy i wątku, które są w bezpośrednim kontakcie z pociskiem określane są jako nitki główne a pozostałe nitki tkaniny, które nie kontaktują się bezpośrednio z czołem pocisku nazywane są nitkami wtórnymi. Podczas uderzenia pocisku w tkaninę następuje ruch nitek głównych w kierunku toru lotu pocisku tworząc tzw. stożek odkształcenia. Jednakże należy zauważyć, że proces pochłaniania energii przez tkaninę jest bardzo skomplikowany. Wynika to z faktu, że pocisk jednocześnie uderza w nitki wątku i osnowy, przeploty pomiędzy tymi nitkami jak również szczeliny występujące pomiędzy tymi nitkami.



Rys. 6. Obszar uderzenia pocisku w tkaninę o splocie płóciennym [53]

Powierzchnia uderzenia tkaniny trafionej pociskiem jest równa powierzchni końcowej pocisku d_{pro} (Rys. 6). Stąd, biorąc pod uwagę pozostałe oznaczenia wielkości na rysunku 6, liczbę nitek osnowy N_e i wątku N_p kontaktujących się z czołem pocisku można obliczyć z zależności (10) i (11):

$$N_e = \frac{d_{pro}}{d_e} \quad (10)$$

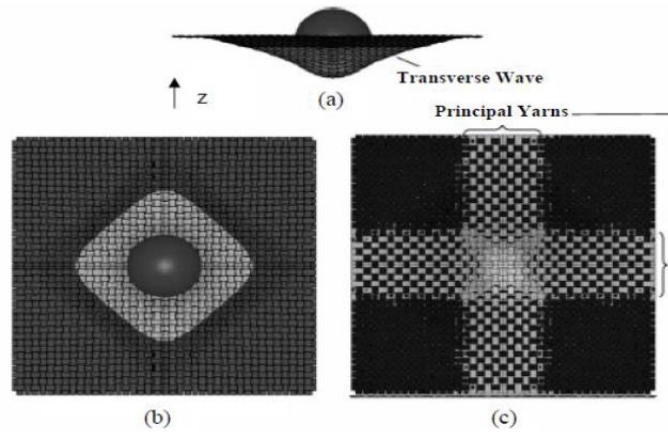
$$N_p = \frac{d_{pro}}{d_{pl}} \quad (11)$$

gdzie:

d_e - podziałka nitek osnowy,

d_{pl} - podziałka nitek wątku.

Badania numeryczne uderzenia pocisku w kształcie kuli w pojedynczą warstwę tkaniny również potwierdzają, że w miejscu uderzenia pocisku zachodzą zjawiska szybkozmiennego lokalnego przemieszczenia nitek głównych w kierunku toru lotu pocisku. Prowadzi to do powstania fali naprężeń rozchodzącej się wzdłuż nitek wątku i osnowy, symetrycznie we wszystkich czterech kierunkach (Rys. 7). Po pewnym czasie od uderzenia fala naprężeń rozchodzi się do sąsiednich nitek struktury tkaniny, podczas gdy odkształcenie w punkcie uderzenia pocisku wzrasta [47].



Rys. 7. Uderzenie poprzeczne w pojedynczą warstwę tkaniny: (a) widok z boku, (b) widok od strony uderzenia pocisku (c) widok od strony stożka odkształcenia [47]

Generowane wartości odkształceń poprzecznych zależą od prędkości uderzenia pocisku i prędkości propagacji fali naprężeń, które w tkaninie rozchodzą się ze stałą prędkością wzdłuż nitek wątku i osnowy, niezależną od prędkości uderzenia pocisku. Prędkość propagacji fali naprężeń w tkaninie c_f określa się zależnością (12) [54-55]:

$$c_f = \frac{c}{\sqrt{2}} \quad (12)$$

Podstawiając zależność (1) do zależności (12) otrzymuje się zależność (13):

$$c_f = \sqrt{\frac{E}{2\rho}} \quad (13)$$

Z zależności (13) wynika, że prędkość propagacji fali naprężeń w tkaninie zależy głównie od rodzaju włókien zastosowanych w nitkach. Fala naprężeń rozchodzi się szybciej w nitkach wątku i osnowy przy wyższym module Younga i niższej gęstości włókna. Energię pochłanianą przez tekstylny pakiet balistyczny E_k oblicza się z zależności (14), w przypadku pakietu przebitego przez pocisk, lub z zależności (15), jeżeli pocisk zostanie zatrzymany w strukturze pakietu balistycznego:

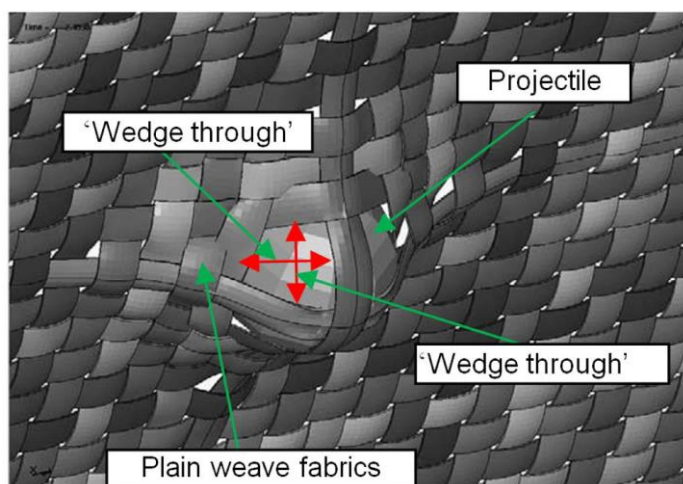
$$E_k = 1/2m(v_i^2 - v_e^2) \quad (14)$$

$$E_k = 1/2mv_i^2 \quad (15)$$

gdzie:

- m - masa pocisku,
- v_i - prędkość uderzenia pocisku,
- v_e - prędkość reszkowa pocisku.

W przypadku przestrzelenia pakietu bardzo ważna jest rejestracja prędkości resztkowej pocisku. Energia tracona przez pocisk i pochłaniana przez miękki pakiet balistyczny może zależeć od różnych mechanizmów uszkodzeń i pochłaniania energii (Rys. 8), a mianowicie rodzaju zastosowanych włókien, gęstości liniowej przędzy, splotu tkaniny, wykończenia powierzchni tkaniny, wymiarów próbki tkaniny, liczby warstw tkaniny i ich ułożenia [56-64].



Rys. 8. Deformacja warstwy tkaniny o splotcie płóciennym podczas uderzenia pocisku [47]

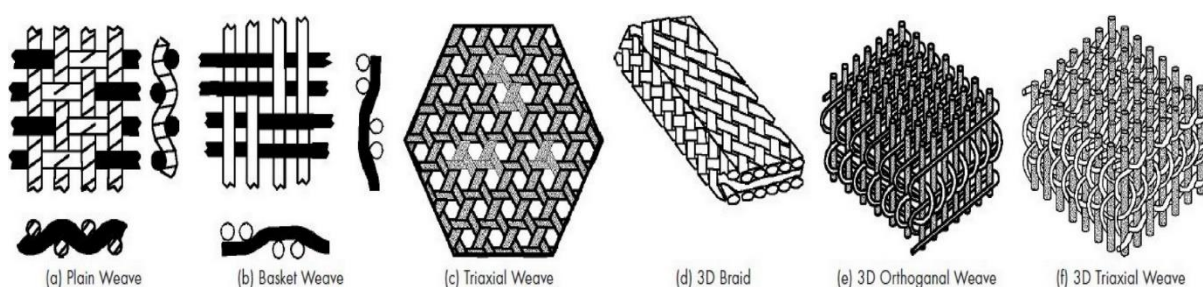
Nitki w tkaninie w wyniku wrobienia ulegają zafalowaniu, które związane jest z przeplataniem nitek zgodnie z raportem tkaniny. Ze względu na efekt wrobienia nitek w tkaninie, poprzeczne obciążenie udarowe na tkaninę, powoduje indukowanie obciążeń poprzecznych w miejscu przeplotów nitek wątku i osnowy. Skutkuje to zmniejszeniem wytrzymałości tkaniny przy przenoszeniu tego typu obciążeń udarnych [65]. Według badań, pierwszym krokiem w procesie deformacji tkaniny jest rozprostowanie nitek [65]. Stwierdzono, że w momencie, gdy nitki stają się bardziej rozprostowane, zaczynają się rozciągać co skutkuje zwiększoną absorpcją energii kinetycznej pocisku przez tkaninę.

2.2.3. Struktury tekstylne stosowane w miękkich osłonach balistycznych

2.2.3.1. Tkaniny jako warstwy pakietów balistycznych

Tkaniny wykonane z wysokowytrzymałych włókien są jedną z najbardziej popularnych struktur tekstylnych stosowanych w miękkich osłonach balistycznych. Charakteryzują się stabilną strukturą wynikającą z przeplotów nitek wątku i osnowy, niską masą, wysoką zdolnością do absorpcji energii kinetycznej pocisku i stosunkowo niskim kosztem [66]. Obecnie na rynku dostępne są różne rodzaje struktur tekstylnych stosowanych w osłonach balistycznych jak tkaniny dwuosiowe 2D, tkaniny 3D, tkaniny trójosiowe i laminaty jednokierunkowe (Rys. 9). Tkanina balistyczna zwykle składa się z przędzy o

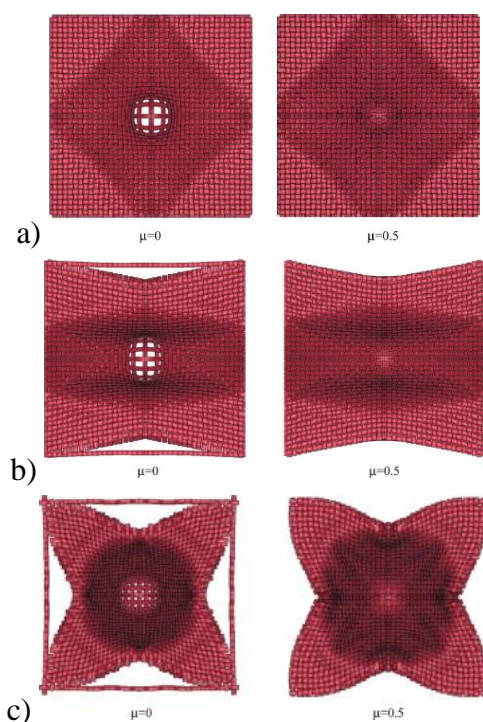
niewielkimi skręcie. Zwiększenie stopnia skręcenia zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie, co może prowadzić do zmniejszenia efektywności balistycznej tkaniny. Według badań [67], idealny kąt skrętu przędzy wynosi około 7° . Stwierdzono, że przędzie para-aramidowe najbardziej wydajnie absorbują energię kinetyczną pocisku przy współczynniku skrętu 1.1 [68]. Liczność przędzy to kolejny czynnik, który wpływa na skuteczność tkaniny jako bariery balistycznej. Stwierdzono, że właściwości użytkowe tkanin wykonanych z przędzy para-aramidowej o małej masie liniowej w zakresie 220-440 dtex były znacznie wydajniejsze niż tkanin wykonanych z przędzy o większej masie liniowej, przy zachowaniu porównywalnej masy powierzchniowej pakietu balistycznego. Mimo tego obecnie masa liniowa przędzy para-aramidowej na poziomie 1000 dtex pozostaje standardem ze względu na wygórowane ceny przędz o małej masie liniowej [69]. Najczęstszymi rodzajami splotów stosowanych w tkaninach przeznaczonych na miękkie pakiety balistyczne jest splot płócienny i rypsowy [50-52]. Tkaniny te wykonuje się z możliwie największą licznnością nitki wątku i osnowy, co prowadzi do uzyskania wyższej stabilności struktury tkaniny.



Rys. 9. Różne struktury tekstylne stosowane na miękkie osłony balistyczne [66]

W celu zrozumienia procesów jakie zachodzą podczas uderzenia pocisku w warstwę tkaniny, przeprowadzono różnego rodzaju badania eksperymentalne i symulacyjne. Jednymi z takich badań były badania, w których analizowano symulacyjnie przy pomocy oprogramowania LS-Dyna uderzenie pocisku w jedną warstwę tkaniny para-aramidowej Kevlar KM2 [70]. Na podstawie rzeczywistych parametrów tkaniny wykonano model geometryczny tkaniny jako strukturę przeplataną. Następnym etapem było przeprowadzenie dyskretyzacji modelu geometrycznego pojedynczej warstwy tkaniny. W kolejnym etapie przyjęto odpowiednie wartości współczynnika tarcia między pociskiem a tkaniną oraz między nitkami osnowy i wątku i określono odpowiedni typ kontaktu. Pocisk o masie równej 0.627 g uderzał z początkową prędkością na poziomie 245 m/s. Przeanalizowanie wyników badań numerycznych pozwoliło na wyciągnięcie wniosku, iż w ocenie efektywności balistycznej tkaniny zagadnienie kontaktu jest istotnym elementem. W przypadku pominięcia współczynników tarcia czas penetracji jak i również prędkość resztkowa pocisku są znacznie zmniejszone w odniesieniu do wielkości obliczanych z uwzględnieniem tarcia między nitkami.

Dalej realizowane były badania dotyczące wpływu mocowania krawędzi tkaniny oraz współczynnika tarcia statycznego oraz dynamicznego między nitkami osnowy i wątku oraz pociskiem a nitkami osnowy i wątku na pochłanianie energii kinetycznej pocisku przez tkaninę [71]. Rzeczywiste parametry tkaniny para-aramidowej Kevlar posłużyły do opracowania modelu geometrycznego jako struktury przeplatanej. Warstwa tkaniny posiadała wymiar 32.7 mm x 32.7 mm. W badaniach numerycznych zostały zastosowane trzy warianty warunków brzegowych dla krawędzi tkaniny: zamocowane cztery krawędzie, zamocowane dwie przeciwległe krawędzie i brak mocowania krawędzi. Aby określić cel wpływu współczynnika tarcia między nitkami osnowy i wątku na absorpcję energii pocisku przez tkaninę przyjęto dwa warianty $\mu_s = \mu_d = 0$ oraz $\mu_s = \mu_d = 0.5$. Symulacje komputerowe przeprowadzono w programie LS-Dyna. Użyto pocisku w kształcie kuli średnicy 8mm oraz masie równej 2.091 g, który uderzał centralnie w warstwę tkaniny. Prędkość uderzenia przyjęta dla pocisku wynosiła 800 m/s. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że warstwa tekstylna posiadająca współczynnik tarcia $\mu_s = \mu_d = 0.5$ między nitkami osnowy i wątku, jest zdolna do większej absorpcji energii kinetycznej niż przy wartości zerowej współczynników tarcia. Następnym etapem analizy był wpływ zamocowania krawędzi tkaniny na sposób odkształcania warstwy. Na rys. 10 zaprezentowano deformację badanej warstwy tekstylnej w zależności od przyjętych warunków brzegowych.

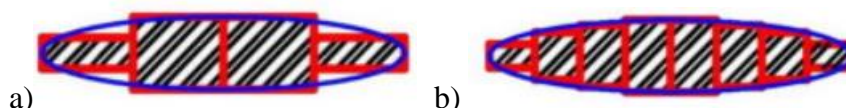


Rys. 10. Deformacja tkaniny podczas uderzenia pocisku: a) zamocowane cztery krawędzie, b) zamocowane dwie przeciwległe krawędzie, c) brak mocowania krawędzi [71]

Na podstawie wyników badań numerycznych dla wariantu z zamocowanymi czterema krawędziami oraz wariantu z krawędziami zamocowanymi przeciwległe do siebie

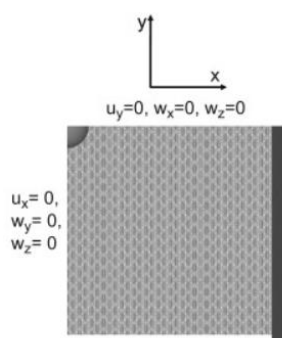
stwierdzono, że energia, która jest absorbowana przez warstwę tkaniny jest większa niż w przypadku wariantu bez mocowania krawędzi tkaniny. Zaobserwowano, iż zamocowanie krawędzi tkaniny wywiera istotny wpływ na sposób odkształcenia się warstwy.

Kolejne badania dotyczyły przeprowadzenia analizy numerycznej uderzenia pocisku w pojedynczą warstwę [72]. Do badań numerycznych zostały opracowane dwie warstwy tkaniny różniące się rodzajem elementów skończonych. Warstwa pierwsza posiadająca splot płócienny wykonana została z elementów skończonych 3D. Opracowane zostały dwa warianty tej warstwy różniące się pod względem ilości elementów skończonych w przekroju poprzecznym nitki: 4 elementy skończone, 8 elementów skończonych (Rys. 11).



Rys. 11. Ilość elementów skończonych w przekroju poprzecznym nitki: a) cztery, b) osiem [72]

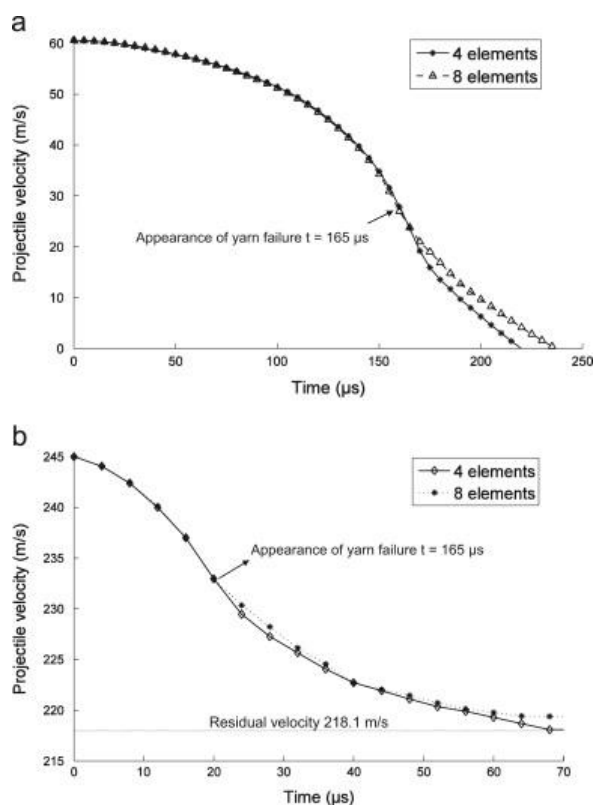
W oparciu o symetrię obiektu w układzie współrzędnym xy przedstawionym na rys. 12, przeprowadzono badania numeryczne dla warstwy pierwszej. Rozwiązanie to miało na celu zmniejszenie czasu obliczeń numerycznych.



Rys. 12. Symetria modelu warstwy z elementów skończonych 3D [72]

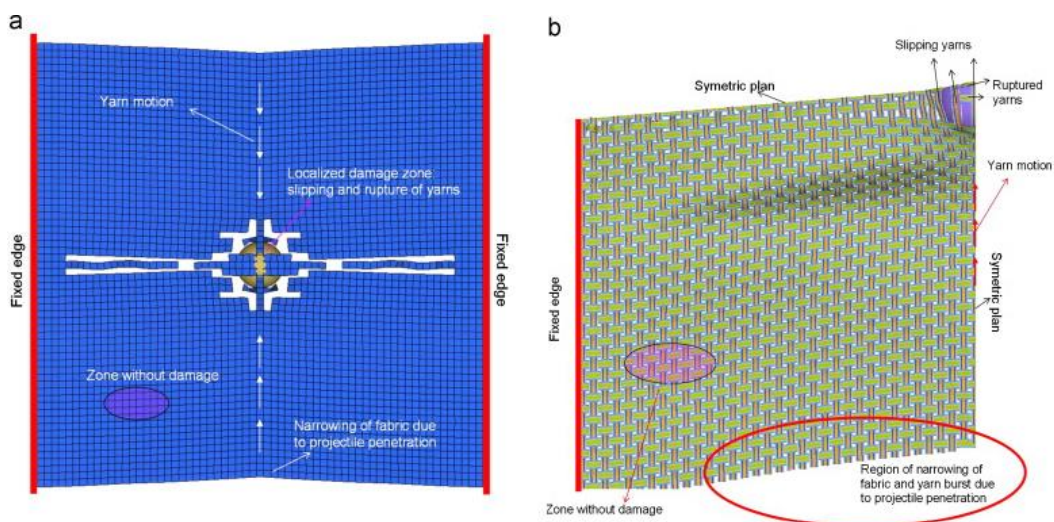
Warstwa druga również miała splot płócienny, ale wykonana została z elementów skończonych 2D. Grubość warstwy tkanej 2D równała się grubości nitek z pierwszej warstwy i stanowiła 0.115 mm. W sporządzonych warstwach stosowano warunek brzegowy polegający na zamocowaniu dwóch przeciwległych krawędzi. Przyjęta wartość współczynników tarcia dynamicznego i statycznego dla obu warstw między nitkami oraz między warstwą tkaniny a pociskiem wynosiła $\mu_s = 0.23$ oraz $\mu_d = 0.19$. Dla warstw zastosowano model ortotropowy i przyjęto parametry takie jak dla tkaniny Kevlar KM2. Celem przeprowadzonych badań było określenie wpływu ilości elementów skończonych w przekroju nitki w warstwie pierwszej na prędkość pocisku podczas penetracji warstw. W warstwach badanych przeprowadzono również analizę porównawczą uszkodzeń na skutek uderzenia pocisku. Analizy numeryczne przeprowadzono w programie Radioss. Pocisk zastosowany był w kształcie kuli i posiadał średnicę 5.35 mm oraz masę 0.625 g.

Zastosowano trzy prędkości początkowe dla pocisku uderzającego centralnie w warstwę: 60.6 m/s, 92.1 m/s oraz 345 m/s. Jako pierwszą przeprowadzono analizę porównawczą resztkowej prędkości pocisku dla prędkości uderzenia równej 60.6 m/s oraz 245 m/s przy zastosowaniu pierwszej warstwy z 4 i 8 elementami skończonymi w przekroju nitki (Rys. 13). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że do chwili rozerwania warstw prędkość pocisku zmniejsza się w ten sam sposób dla obu wersji tkanin zawierających 4 i 8 elementów skończonych w przekroju poprzecznym nitek. Pewne zmiany w wartościach prędkości resztkowej pocisku dostrzeżono w chwili rozerwania nitek w miejscu oddziaływania penetratora. Warstwa posiadająca nitki z czterema elementami skończonymi w przekroju poprzecznym, posiadała mniejszą wartość prędkości resztkowej pocisku niż warstwa składająca się z nitek posiadających osiem elementów skończonych w przekroju poprzecznym.



Rys. 13. Prędkości pocisku w funkcji czasu dla prędkości uderzenia: a) 60.6 m/s, b) 245 m/s [72]

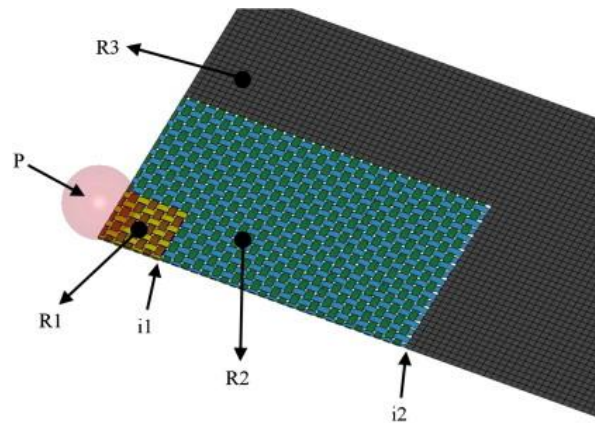
Na podstawie tych badań stwierdzono, że przestrzelenie warstwy z większą liczbą elementów skończonych w przekroju poprzecznym nitek jest łatwiejsze niż dla warstwy z mniejszą ilością elementów skończonych w przekroju nitki. W kolejnym etapie tych badań przeprowadzono analizę porównawczą destrukcji warstwy z elementami skończonymi 3D i 2D dla pocisku o prędkości uderzenia 245 m/s, (Rys. 14).



Rys. 14. Uszkodzenia warstw na skutek uderzenia pocisku z prędkością początkową 245 m/s: a) warstwa z elementami skończonymi 3D, b) warstwa z elementami skończonymi 2D [72]

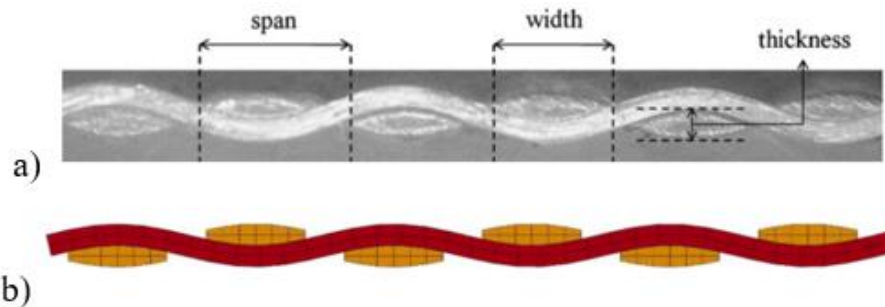
Stwierdzono, iż dla obu warstw pojawiają się charakterystyczne trzy obszary: 1/ obszar rozerwanych nitki w miejscu oddziaływania penetratora, 2/ obszar zwężenia niezamocowanych krawędzi warstwy, 3/ występowanie strefy bez uszkodzeń.

Poznanie skomplikowanych i złożonych zjawisk występujących pomiędzy tkaniną a pociskiem umożliwiają badania numeryczne uderzenia pocisku w tekstylną osłonę z uwzględnieniem modelu geometrycznego nitki osnowy i wątku. Do przeprowadzenia tego typu modelowania i obliczeń numerycznych wymagane są systemy komputerowe posiadające dużą moc obliczeniową. Często, z uwagi na brak dostępności tego typu systemów obliczeniowych, stosuje się uproszczenia modelu geometrycznego tkaniny i pakietów balistycznych, co pozwala na realizowanie badań symulacyjnych przez systemy o mniejszej wydajności obliczeniowej. Podejście do tego typu uproszczeń zostało zastosowane do badania efektywności balistycznej tkaniny para-aramidowej Kevlar KM2, poddanej centralnemu ostrzałowi pociskiem stalowym w kształcie kuli o średnicy 5.55 mm i masie 0.63 g, z prędkością uderzenia 40, 100 i 200 m/s [73]. Analizy numeryczne przeprowadzono w programie LS-Dyna. W badaniach wyznaczano prędkość resztkową pocisku i analizowano mechanizmy deformacji tkaniny po uderzeniu. W pierwszym etapie badań opracowano model tkaniny składający się z trzech różnych układów geometrycznych w postaci przeplatanych nitki wątku i osnowy modelowanych jako struktury 3D, przeplatanych nitki wątku i osnowy modelowanych jako struktury 2D oraz zhomogenizowanej struktury 2D (Rys. 15).



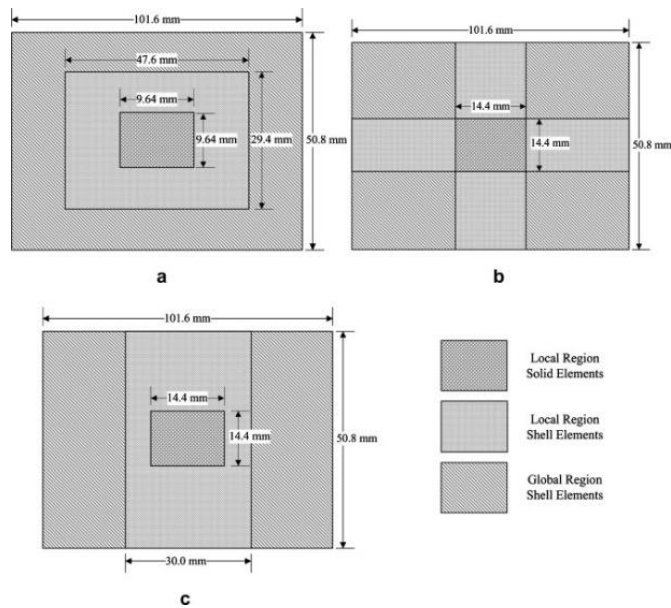
Rys. 15. Model geometryczny warstwy tkaniny, gdzie: P- pocisk, R1 – miejsce bezpośredniego uderzenia pocisku – struktura przeplatana z elementami skończonymi 3D, R2 – struktura przeplatana z elementami skończonymi 2D, R3 – powłoka z elementami skończonymi 2D [73]

Model struktury przeplatanej 3D wykonano w oparciu o parametry wyznaczone z rzeczywistego przekroju poprzecznego tkaniny Kevlar KM2 (Rys. 16). Na podstawie zdjęć mikroskopowych przyjęto podziałkę nitki w tkaninie równą 0.747mm, szerokość nitki 0.536 mm oraz grubość nitki 0.115 mm.



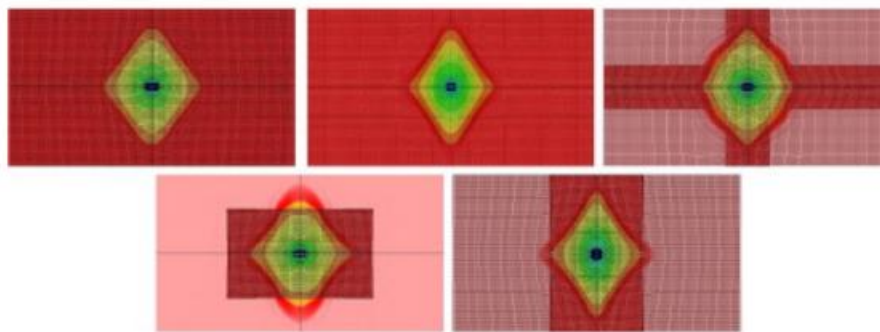
Rys. 16. Przekrój poprzeczny tkaniny Kevlar KM2, a) widok pod mikroskopem, b) numeryczny model tkaniny [73]

Badania numeryczne zostały przeprowadzone dla jednej warstwy tkaniny o wymiarach 101.6 mm x 50.8 mm dla pięciu różnych wariantów ułożenia obszarów modelujących strukturę tkaniny. Pierwszy wariant tkaniny został wykonany w całości jako struktura przeplatana z elementami skończonymi 3D. Z kolei drugi wariant opracowano ze struktury przeplatanej z elementami 3D o wymiarach 9,64 mm x 9,64 mm w miejscu uderzenia pocisku, którą połączono dalej ze strukturą przeplataną z elementami skończonymi 2D. Następne trzy warianty tkanin zaprezentowano na rys. 17.



Rys. 17. Warianty modelowania struktury tkaniny: a) układ lokalny, b) układ krzyżowy, c) układ pasmowy [73]

Warunek brzegowy zastosowany dla tkaniny polegał na zamocowaniu wszystkich czterech krawędzi tkaniny. Określono kontakt między nitkami osnowy i wątku oraz między warstwą a pociskiem. Zastosowano opcję `CONSTRAINED_SHELL_TO_SOLID` w celu połączenia struktury przeplatanej z elementami 3D ze strukturą przeplataną z elementami 2D. Połączenie struktury przeplatanej elementów skończonych 2D z obszarem bez przepłotu będącym powłoką 2D uzyskano dzięki zastosowaniu opcji `CONSTRAINED_TIE_BREAK`.

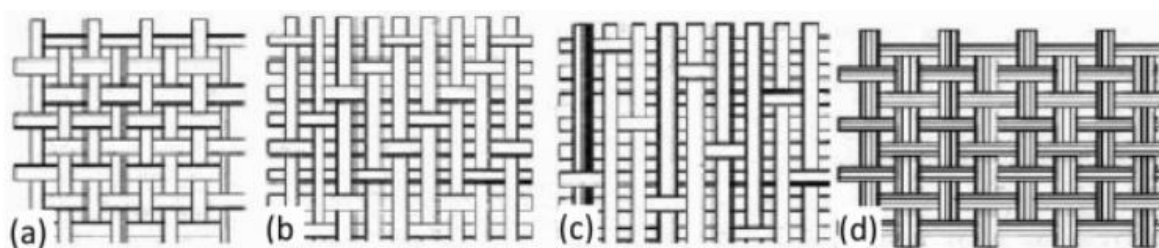


Rys. 18. Rozkład deformacji w tkaninie podczas uderzenia pocisku z prędkością 100 m/s dla chwili czasowej 75 μ s po uderzeniu pocisku: a) warstwa wykonana jako struktura przeplatana z elementami skończonymi 3D, b) warstwa wykonana z dwóch obszarów – struktury przeplatanej z elementami 3D i struktury przeplatanej z elementami skończonymi 2D, c) układ lokalny, d) układ krzyżowy, e) układ pasmowy [73]

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań zaobserwowano, iż dla prędkości uderzenia pocisku równej 40 m/s sposób rozchodzenia się deformacji dla czterech wersji kombinowanych modeli tkaniny jest zbliżony jak dla modelu wykonanego w całości jako struktura przeplatana z elementami skończonymi 3D. Z kolei przy prędkości uderzenia pocisku 100 oraz 200 m/s zauważono, iż po czasie 50 μ s dla warstwy o układzie krzyżowym

rozkład odkształcenia ulega zafalowaniu. Przy układzie pasmowym oraz układzie lokalnym sposób i obszar odkształcenia warstwy, różni się od odkształcenia warstwy wykonanej tylko ze struktury przeplatanej z elementami skończonymi 3D (Rys. 18). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że dla badanych wariantów modeli tkaniny prędkość resztkowa pocisku była na zbliżonym poziomie dla prędkości uderzenia 40, 100 i 200 m/s. Badania pokazały, że proces obliczeń numerycznych został najszybciej ukończony dla układu krzyżowego oraz układu lokalnego.

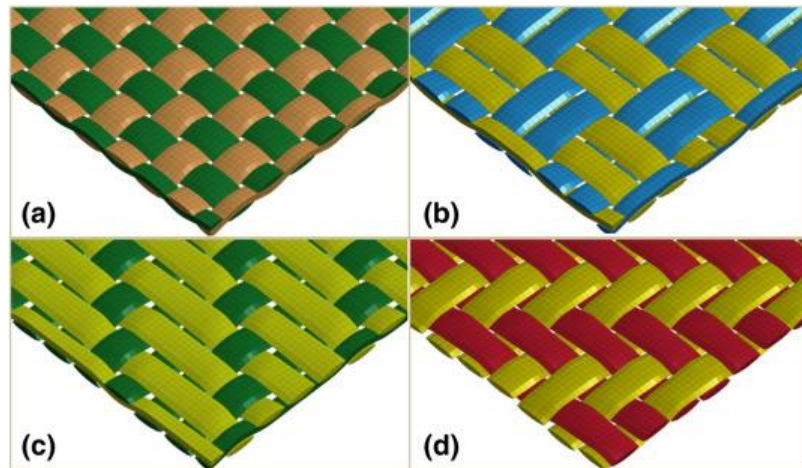
Prowadzono również badania eksperymentalne mające na celu określenie wpływu rodzaju splotu tkaniny na właściwości balistyczne [74]. Badane tkaniny wykonane były z tego samego surowca Kevlar 29 o tej samej liczności nitek wątku i osnowy. Badano tkaniny o następujących splotach: splot płócienny, splot skośny 3/1 i 2/2, splot atlasowy 8-nitkowy, splot panamowy 2x2 i panamowy 3x3. Niektóre z tych splotów przedstawiono na rys. 19.



Rys. 19. Badane struktury tkaniny Kevlar 29: a) splot płócienny, b) splot skośny 3/1, c) plot atlasowy 8-nitkowy, d) splot panamowy 3x3 [74]

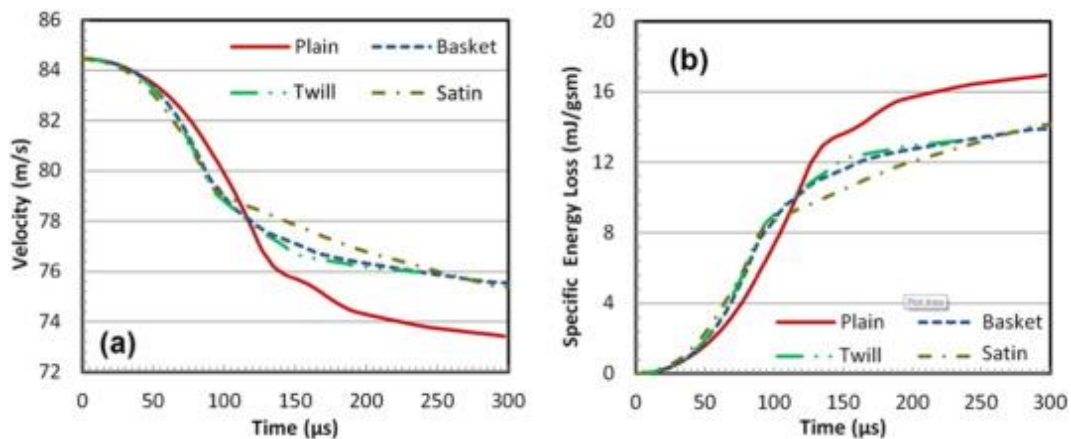
Badane struktury tekstylne poddano ostrzałowi pociskiem ze stalowym rdzeniem AP o masie 5.1 g oraz pociskiem AK 47 M43 8g FMJ. Wyniki badań zaabsorbowanej energii kinetycznej pocisku przez poszczególne tkaniny różniące się splotem normalizowano do tkaniny o grubości 1 mm oraz do masy powierzchniowej tkaniny 1000 g/m^2 . Stwierdzono, że największą efektywność balistyczną wykazują tkaniny o splotcie płóciennym i skośnym 3/1 a najgorszą tkaniny o splotcie atlasowym. Z kolei badano efektywność pakietów balistycznych złożonych z 7 warstw tkanin. Największą efektywność balistyczną posiadały pakiety z tkaninami o splotcie panamowym 2x2 i płóciennym a najgorszą pakiety z tkaninami o splotcie atlasowym. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że tkaniny przeznaczone na osłony balistyczne powinny posiadać stabilną konstrukcję.

Podobne badania wpływu splotu tkaniny na jej efektywność balistyczną realizowano numerycznie za pomocą oprogramowania LS-Dyna [75]. Badaniu poddano pojedynczą warstwę tkaniny jak również pakiety składające się z 5 warstw tkanin zróżnicowanych pod względem splotu. W pierwszym etapie opracowano modele numeryczne tkanin o splotach płóciennym, panamowym, atlasowym i skośnym (Rys. 20).



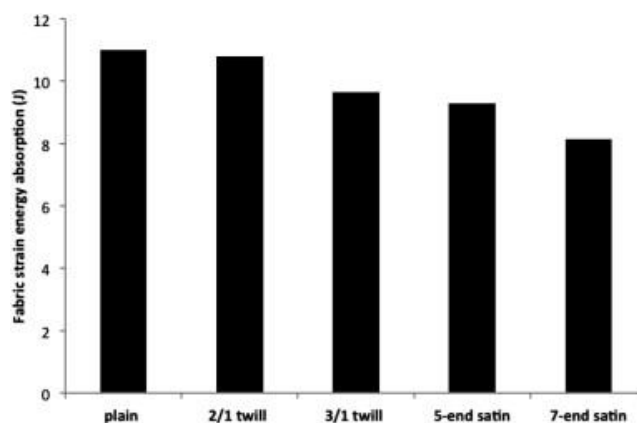
Rys. 20. Modele geometryczne tkanin: a) splot płócienny, b) splot panamowy, c) splot atlasowy, d) splot skośny [75]

Model materiałowy dla elementów skończonych przyjęto na podstawie przeglądu literatury a parametry modelu przyjęto jak dla para-aramidu Twaron. Opracowana do badań warstwa tkaniny posiadała wymiar 120 mm x 120 mm. Przeprowadzona została weryfikacja przyjętego modelu materiałowego poprzez przeprowadzenie badań eksperymentalnych dla pojedynczej warstwy tkaniny o splocie płóciennym. Warstwa tkaniny została umieszczona w ramie stalowej o wymiarze 120 mm x 120 mm. Z broni gazowej ze sprężonym helem strzelano pociskami kal. 0.30 cal o prędkości uderzenia od 70 m/s do 150 m/s. Rejestrowana była prędkość reszkowa pocisku oraz prędkość uderzenia. Dla prędkości uderzenia pocisku, które zarejestrowano podczas badań eksperymentalnych przeprowadzono badania numeryczne uderzenia pocisku w warstwę tkaniny o splocie płóciennym w warunkach zamocowania wszystkich czterech krawędzi tkaniny. Zdefiniowano następnie algorytm kontaktu przyjmując wartości współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego między nitkami $\mu_s = 0.23$ i $\mu_d = 0.19$ a między nitkami a pociskiem $\mu_s = \mu_d = 0.18$. Dla przyjętego modelu materiałowego po weryfikacji dla jednej warstwy zaobserwowano, że w przeprowadzonych badaniach numerycznych prędkość reszkowa pocisku uzyskała zbliżone wartości jak w trakcie badań eksperymentalnych. W badaniach wpływu splotu tkaniny na efektywność balistyczną przeprowadzono badania numeryczne uderzenia pocisku z prędkością 84,5 m/s w jedną warstwę tkaniny. Analizowano prędkość reszkową pocisku oraz energię absorbowaną przez pojedynczą warstwę w zależności od przyjętego splotu tkaniny (Rys. 21). Stwierdzono, że warstwa tkaniny o splocie płóciennym wykazuje największą efektywność balistyczną, gdzie obserwuje się najmniejszą prędkość reszkowa pocisku i największą absorpcję energii kinetycznej pocisku. W następnym etapie analizowano efektywność pakietów składających się z 5 warstw tkanin o różnym splocie. Po przeprowadzonej analizie stwierdzono, że dla pakietów różniących się splotem tkanin, prędkość reszkowa pocisku była na podobnym poziomie w zakresie wartości od 176 do 179 m/s.



Rys. 21. Wyniki badań numerycznych dla pojedynczej warstwy w zależności od splotu tkanin: a) prędkość resztkowa pocisku, b) energia absorbowana przez warstwę [75]

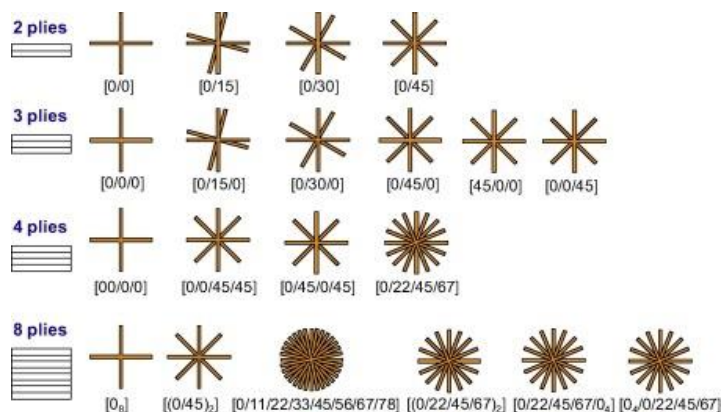
Podobne badania realizowano za pomocą metody elementów skończonych, gdzie badano wpływ splotu tkaniny na efektywność pochłaniania energii kinetycznej pocisku [76]. Badania przeprowadzono dla pięciu modeli tkanin o splotcie płóciennym, skośnym 2/1 i 3/1, atlasowym 5- i 7-nitkowym. W tkaninach zastosowano przędze o tej samej gęstości liniowej, która wynosiła 174 tex. Tkaniny posiadały licznosc nitek wątku i osnowy równą 6.75 nitek/cm. Wyniki symulacji pokazały, że tkanina o splotcie płóciennym absorbuje o 34% energii kinetycznej pocisku więcej niż tkanina najmniej efektywna o splotcie atlasowym 7-nitkowym (Rys. 22). Stwierdzono, że może to zależeć od większej liczby przeplotów w tkaninie o splotcie płóciennym, mogące korzystnie wpływać na przenoszenie naprężeń na większą powierzchnię tkaniny angażując tym samym większą liczbę nitek nie kontaktujących się z czołem pocisku w rozpraszanie energii.



Rys. 22. Energia absorpcji dla badanych tkanin o zróżnicowanych splotach [76]

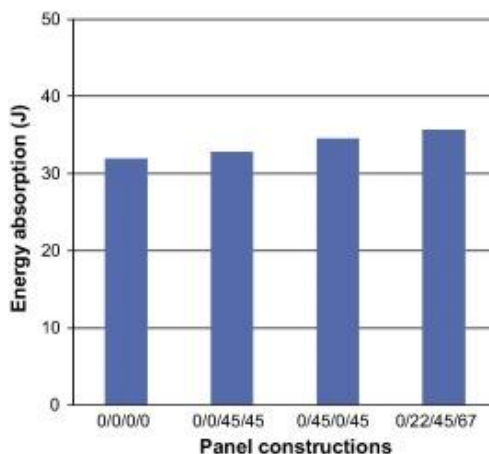
W dalszej części badań stwierdzono, że właściwości balistyczne tkaniny o splotcie płóciennym zależą od wrobienia nitek wątku i osnowy. Zauważono, że absorpcja energii przez tkaninę maleje wraz ze wzrostem stopnia wrobienia nitek a w wielowarstwowych układach wysoki poziom wrobienia nitek zwiększa ugięcie poprzeczne tylnej strony pakietu.

Obok struktury samej tkaniny również orientacja tkaniny w strukturze pakietu ma wpływ na jego właściwości balistyczne. Przeprowadzono badania numeryczne oceny absorpcji energii kinetycznej pocisku przez pakiety balistyczne składające się z tkanin o różnej orientacji (Rys. 23) [77]. Model numeryczny tkaniny opracowano za pomocą programu ABAQUS.



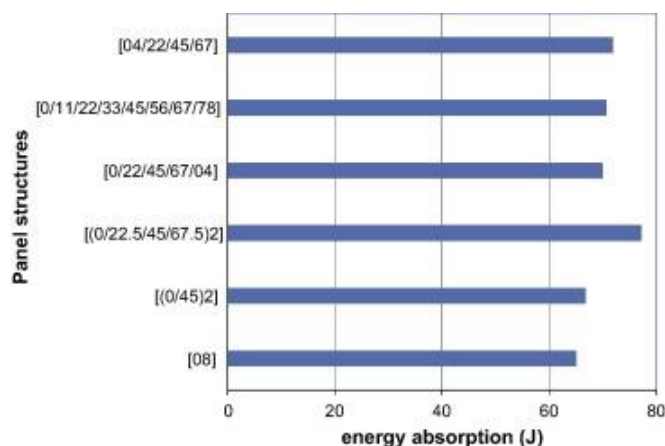
Rys. 23. Schemat warstw tkanych w pakietach balistycznych [77]

Wyniki badań symulacyjnych wykazały, że zmiana kąta ułożenia warstwy znacząco wpływa na zdolność pochłaniania energii przez wielowarstwowy pakiet balistyczny. Pakiety z ułożeniem warstw pod kątem zawsze wykazują lepszą zdolność pochłaniania energii w porównaniu z pakietami ze stałą orientacją warstw (Rys. 24).



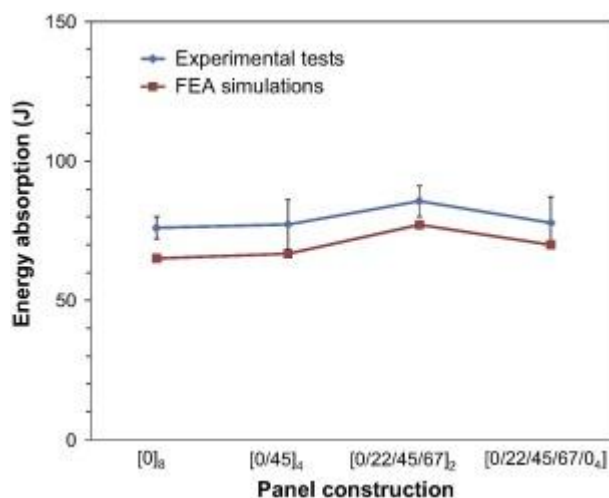
Rys. 24. Absorpcja energii dla pakietów czterowarstwowych o zróżnicowanej orientacji warstw [77]

Wykazano również, że dla pakietów posiadających większą liczbę warstw, ważna jest kolejność ułożenia grup warstw o określonym kącie obrotu. Dla przykładu w pakiecie zawierającym osiem warstw pakiet złożony z dwóch powtórzeń ułożenia warstw [(0/22.5/45/67.5)₂] wykazał najlepszą zdolność do absorbowania energii kinetycznej pocisku (Rys. 25).



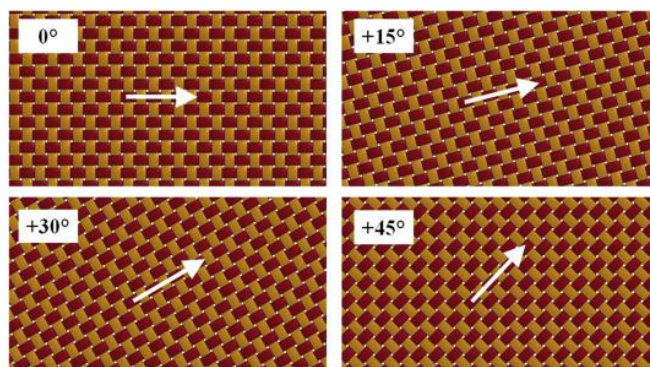
Rys. 25. Absorpcja energii dla pakietów ośmiowarstwowych o zróżnicowanej orientacji warstw [77]

W dalszym etapie przeprowadzono weryfikację badań numerycznych poprzez ostrzał pakietów ułożonych według określonej orientacji warstw (Rys. 26). Na podstawie wyników badań eksperymentalnych potwierdzono, że odpowiednia orientacja warstw w pakiecie zwiększa ilość absorbowanej energii kinetycznej pocisku. W badaniach eksperymentalnych ilość pochłanianej energii przez pakiet z orientacją warstw $[0/22/46/67]_2$ była o ok. 14 % większa w stosunku do pakietu ze stałą orientacją warstw.



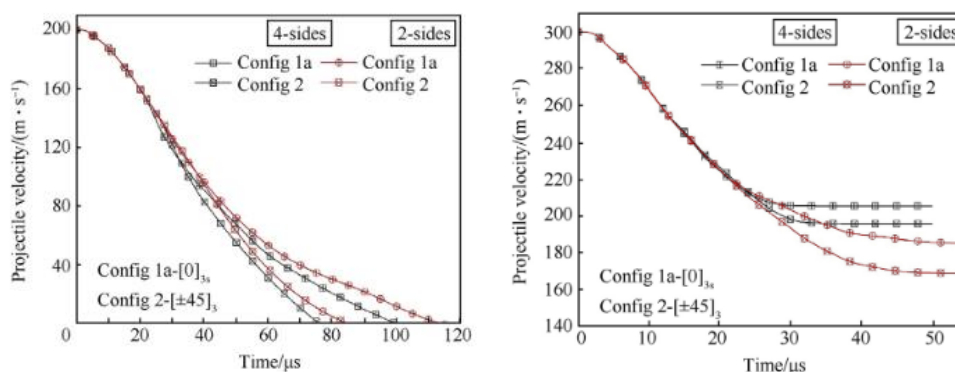
Rys. 26. Badania numeryczne i eksperymentalne absorpcja energii dla pakietów o różnej orientacji warstw [77]

Podobne badania wpływu orientacji warstw w pakiecie na jego właściwości balistyczne były realizowane w warunkach zakleszczenia wszystkich i przeciwległych krawędzi pakietu [78]. Orientacja polegała na zmianie kąta ułożenia warstwy w pakiecie o określoną wartość: 0° , $+15^\circ$, $+30^\circ$ i $+45^\circ$ (Rys. 27). Przyjęto również trzy poziomy współczynnika tarcia pomiędzy nitkami osnowy i wątku: 0.10, 0.18 i 0.3. W badaniach numerycznych zastosowano parametry dla tkaniny aramidowej o splocie płóciennym Kevlar S706. Wszystkie pakiety składały się z 6 niezszytych warstw o wymiarach 76.2 mm x 76.2 mm.



Rys. 27. Orientacja warstw w pakiecie balistycznym [78]

W badaniach symulacyjnych zastosowano stalowy pocisk w kształcie kuli o masie 0.692 g i średnicy 5.556 mm. Pocisk uderzał centralnie w środek pakietu. Badania numeryczne realizowano dla dwóch prędkości uderzenia pocisku: nieprzebijającej 200 m/s i penetrującej 300 m/s. Między pociskiem a tkaniną zastosowano współczynnik tarcia równy 0.23. Badania symulacyjne realizowano przy użyciu oprogramowania LS-DYNA. Efektywność balistyczną oceniano na podstawie czasu potrzebnego do zatrzymania pocisku, deformacji pakietu podczas uderzenia niepenetrującego oraz prędkości resztkowej dla ostrzału penetrującego.

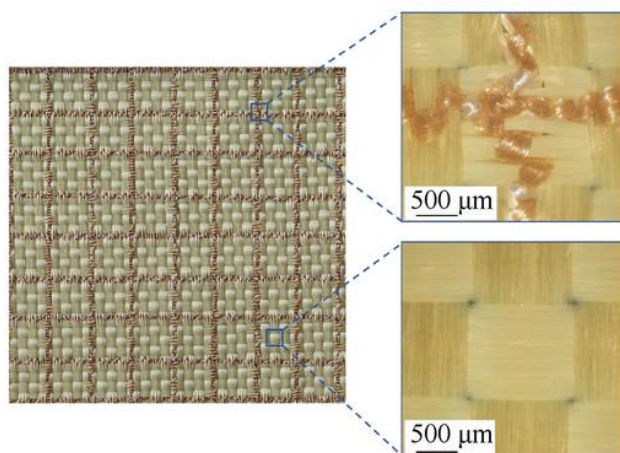


Rys. 28. Zmiana prędkości pocisku podczas ostrzału pakietów o orientacji warstw 0 i $\pm 45^\circ$ z prędkością uderzenia 200 i 300 m/s [78]

Na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych stwierdzono, że ułożenie warstw w orientacji $\pm 45^\circ$ skraca czas zatrzymania pocisku w warunkach ostrzału niepenetrującego a w przypadku ostrzału penetrującego, prędkość resztkowa pocisku jest mniejsza (Rys. 28).

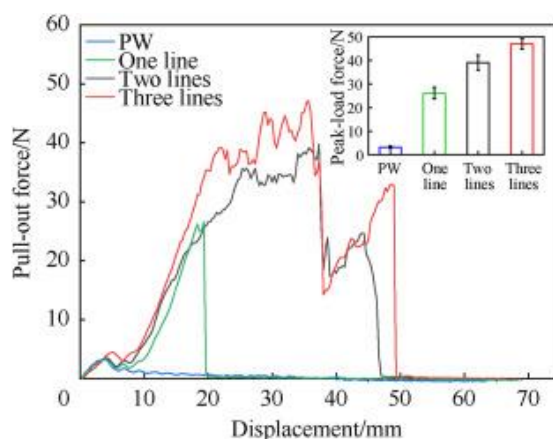
Znane są badania wpływu zszywania warstw pakietu na jego efektywność balistyczną [79]. W badaniach zastosowano tkaninę para-aramidową Kevlar 29 oraz Tekmilon UHMWPE. Przygotowano serie 18 próbek zróżnicowanych pod względem typu tkaniny, liczby warstw oraz sposobu przeszycia. Pakiety składały się z jednej, dwóch i trzech warstw, które przeszyciano osobno lub tworząc przeszycia przez dwie i trzy warstwy. Modyfikowano również trajektorie przeszycia, do którego użyto nici bawełnianej. Przeszycie wykonano na hafciarce z głowicą realizującą podstawowy ścieg odpowiadający

stępnówce (ścieg czółenkowy). Na rys. 29 przedstawiono widok próbki tkaniny Kevlar 29 po przeszyciu wraz z powiększeniem obszaru z przeszyciem i widocznym ściegiem uformowanym w strukturze tkaniny oraz bez przeszycia.



Rys. 29. Widok fragmentu przeszyciej tkaniny Kevlar 29 wraz z powiększeniem obszaru z przeszyciem i bez przeszycia [79]

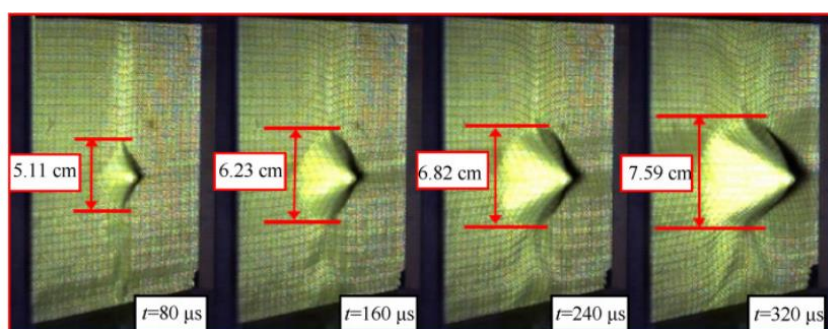
Do eksperymentalnych badań balistycznych zastosowano pocisk w postaci stalowej kuli o średnicy 8 mm i masie 2 g. W badaniach eksperymentalnych pocisk posiadał dwie prędkości uderzenia 230 i 400 m/s. Do rejestracji deformacji tkaniny zastosowano kamerę Photron FastCam SA-Z, która rejestrowała obraz z prędkością 20000 klatek/s w rozdzielczości 512×512 pikseli. W pierwszym etapie badań eksperymentalnych przeprowadzono testy wyciągania nitki ze struktury, które miały na celu zbadanie wpływu liczby ścieżek przeszycia na siłę potrzebną do wyciągnięcia pojedynczej nitki z próbki (Rys. 30).



Rys. 30. Wykres zależności siły w funkcji przemieszczenia dla próbek nieprzeszytych oraz przeszytych [79]

W wyniku tych badań stwierdzono, że efekt przeszycia wpływa korzystnie na zwiększenie siły tarcia pomiędzy nitkami wątku i osnowy co w konsekwencji przekłada się na zwiększenie siły potrzebnej do wyciągnięcia nitki z takiej struktury. Dodatkowo zauważono,

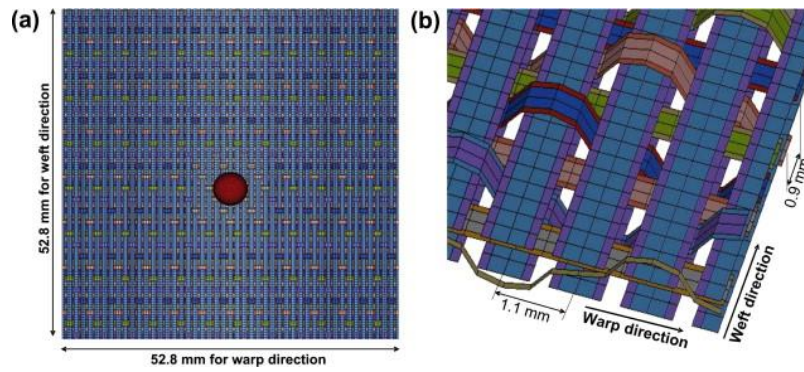
że maksymalna siła wyciągania wzrasta wraz ze wzrostem liczby przeszyc, co sugeruje, że tarcie między nitkami w tkaninie jest większe. Największą wartość siły zaobserwowano dla próbki przeszycy trzykrotnie wynosiła ona 46 J, natomiast najmniej dla próbki bez przeszycia. W dalszym etapie badań eksperymentalnych przeprowadzono serie testów balistycznych. Wyniki badań wykazały, że przeszycie pakietów może znacznie poprawić zdolność do pochłaniania energii przez pakiet. Stwierdzono, że próbki przeszycie miały lepsze właściwości balistyczne w porównaniu z próbkami bez przeszycia. Dla pakietu składającego się z trzech warstw tkaniny Kevlar 29 przeszycy razem pod kątem $0^\circ/90^\circ$ zauważono najbardziej znaczącą poprawę efektywności balistycznej.



Rys. 31. Deformacja pakietu przeszycyego pod kątem $0^\circ/90^\circ$ przy prędkości uderzenia pocisku 230 m/s [79]

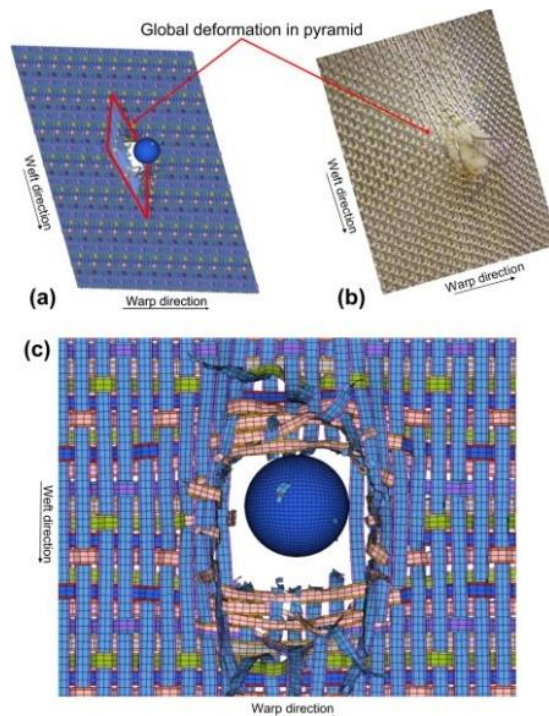
Jak widać na rys. 31, dla prędkości uderzenia 230 m/s pakiet ten całkowicie zatrzymał pocisk. Pozostałe warianty przy prędkości uderzenia pocisku równej 230 m/s zostały przestrelone. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że wraz ze wzrostem gęstości przeszycia pakietów, absorpcja energii kinetycznej pocisku rośnie, jednak po przekroczeniu pewnej gęstości zaczyna maleć. Jest to głównie związane nadmiernym ograniczeniem ruchliwości nitek w strukturze tkaniny. Stwierdzono również, że właściwości balistyczne zszywanych pakietów są najkorzystniejsze, gdy kąt przeszycia wynosi odpowiednio $-15^\circ/+75^\circ$.

Innymi ciekawymi strukturami, badanymi pod kątem właściwości balistycznych są tkaniny 3D. Mechanizmy zniszczenia podczas uderzenia pocisku analizowano numerycznie i eksperymentalnie dla tkaniny 3-warstwowej Kevlar KM2 [80]. W celu weryfikacji modelu numerycznego przeprowadzono badania eksperymentalne dla dwóch prędkości uderzenia pocisku 900 m/s z perforacją oraz 90 m/s bez perforacji. Badano również wpływ warunków brzegowych na mechanizmy uszkodzeń. Warunki brzegowe podzielono na dwa przypadki - z zamocowaniem nitek osnowy i zamocowaniem nitek wątku. Prędkość uderzenia pocisku przy zastosowaniu warunków brzegowych wynosiła 200 m/s.



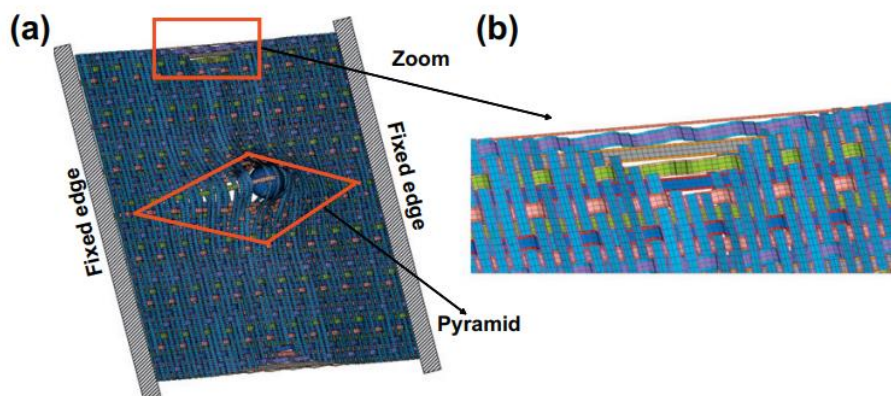
Rys. 32. Widok modelu numerycznego warstwy: a) przed uderzeniem pocisku, b) widok przeplatania nitki w 3-warstwowej tkaninie Kevlar KM2 [80]

W badaniach numerycznych opracowano model wirtualny tkaniny 3D w oparciu o rzeczywistą strukturę (Rys. 32) a obliczenia symulacyjne przeprowadzono w środowisku Radioss. Dla warstwy o wymiarze 52.8×52.8 mm przyjęto parametry wytrzymałościowe para-aramidu Kevlar KM2. W badaniach symulacyjnych zastosowano pocisk kształt o średnicy 5.43 mm i masie 0.631 g. Określono wartości współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego pomiędzy nitkami oraz między tkaniną a pociskiem przejmując odpowiednio $\mu_s = 0.23$ i $\mu_d = 0.20$. W badaniach numerycznych i eksperymentalnych zauważono formowanie się charakterystycznego odkształcenia poprzecznego tkaniny kształcie piramidy (Rys. 33). Stwierdzono, że obszar deformowanej warstwy na skutek uderzenia pocisku zależy od stopnia wrobienia nitki osnowy i wątku.



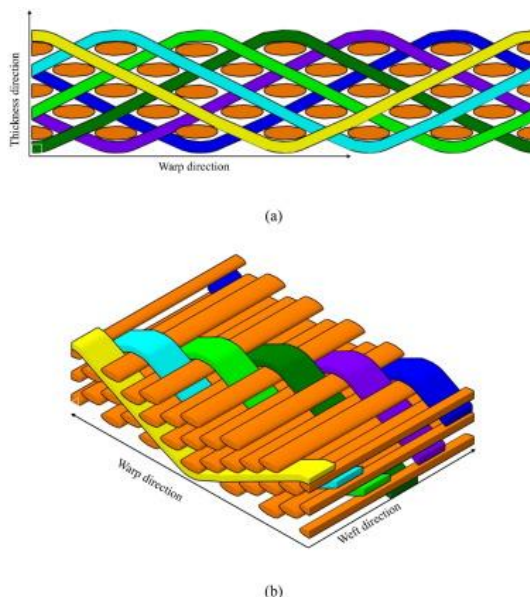
Rys. 33. Widok przestrzelonych warstw po ostrzale pociskiem o prędkości uderzenia 900 m/s dla: a) numerycznego modelu warstwy, b) eksperymentalnej próbki, c) fragment warstwy – moment przebicia [80]

W kolejnym etapie analizowano wpływ zamocowania na sposób deformacji badanej warstwy. Stwierdzono, że podczas uderzenia pocisku nitki, które nie są zamocowane na krawędziach, wysuwają się ze struktury tkaniny i przesuwają w kierunku punktu uderzenia pocisku (Rys. 34).



Rys. 34. Widok warstwy podczas badań numerycznych: a) warstwa zamocowana po nitkach osnowy, b) fragment krawędzi z widocznymi wysuwanymi się z tkaniny watkami [80]

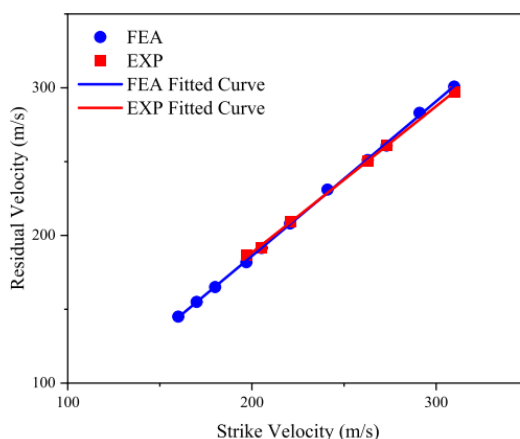
W innych badaniach numerycznych i eksperymentalnych przedstawiono analizę efektywności balistycznej tkaniny typu interlock 3D wykonanej z przędzy Kevlar K49 [81]. W badaniach była stosowana pięciowarstwowa tkanina 3DAWF, która składała się z prostych nitek wążku połączonych nitkami osnowy jak pokazano na rys. 35.



Rys. 35. Struktura pięciowarstwowej tkaniny 3DAWF: a) przekrój tkaniny, b) architektura struktury 3DAWF [81]

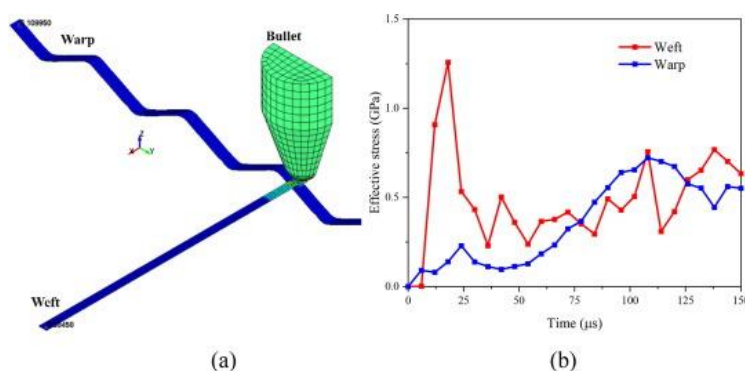
W badaniach numerycznych i eksperymentalnych zastosowano pocisk 9 mm FMJ o prędkości uderzenia w zakresie od 190 do 310 m/s. Badania numeryczne realizowano

w programie LS-Dyna. Dla warstwy przyjęto model materiałowy *MAT_PLASTIC_KINEMATIC. Zdefiniowano kontakt pomiędzy pociskiem a warstwą oraz pomiędzy nitkami osnowy a nitkami wątku przyjmując kontakt AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE. Zdefiniowano wartości współczynnika tarcia statycznego i dynamicznego przyjmując odpowiednio wartości 0.3 i 0.28. W przeprowadzonych badaniach numerycznych i eksperymentalnych analizowano prędkość resztkową pocisku (Rys. 36).



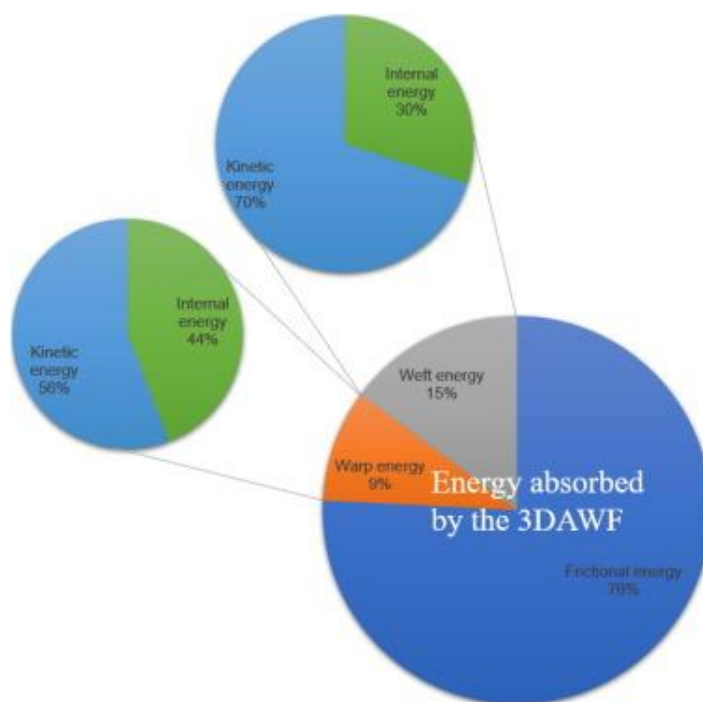
Rys. 36. Zależność prędkości resztkowej od prędkości uderzenia pocisku w badaniach numerycznych i eksperymentalnych [81]

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że zależność uzyskana z badań numerycznych odpowiada zależności uzyskanej z testów eksperymentalnych w zakresie badanych prędkości uderzenia pocisku (Rys. 36) co świadczyło, że przyjęty model materiałowy i parametry wytrzymałościowe są poprawne. Dalszy etap badań symulacyjnych i eksperymentalnych wykazał, że absorpcja energii kinetycznej pocisku wynika z rozciągania i zrywania nitek głównych a wartości naprężeń w nitkach wątku są dwa razy większe niż w nitkach osnowy. Obszar naprężeń obejmuje całą długość nitek wątku, podczas gdy naprężenia w nitkach osnowy rozchodzą się znacznie wolniej. Wnioskowano, że jest to wynikiem prostych nitek wątku w stosunku do zafalowanych nitek osnowy (Rys. 37).



Rys. 37. Naprężenia w nitkach głównych wątku i osnowy: a) rozkład naprężeń w nitkach, b) czasowy wykres zależności efektywnego naprężenia w nitkach wątku i osnowy dla prędkości uderzenia 220.7 m/s [81]

Podsumowując stwierdzono, że na energię pochłanianą przez warstwę tkaniny składa się energia tarcia pomiędzy nitkami wątku i osnowy, energia odkształceń sprężystych nitek wątku i osnowy oraz energia kinetyczna nitek (Rys. 38).



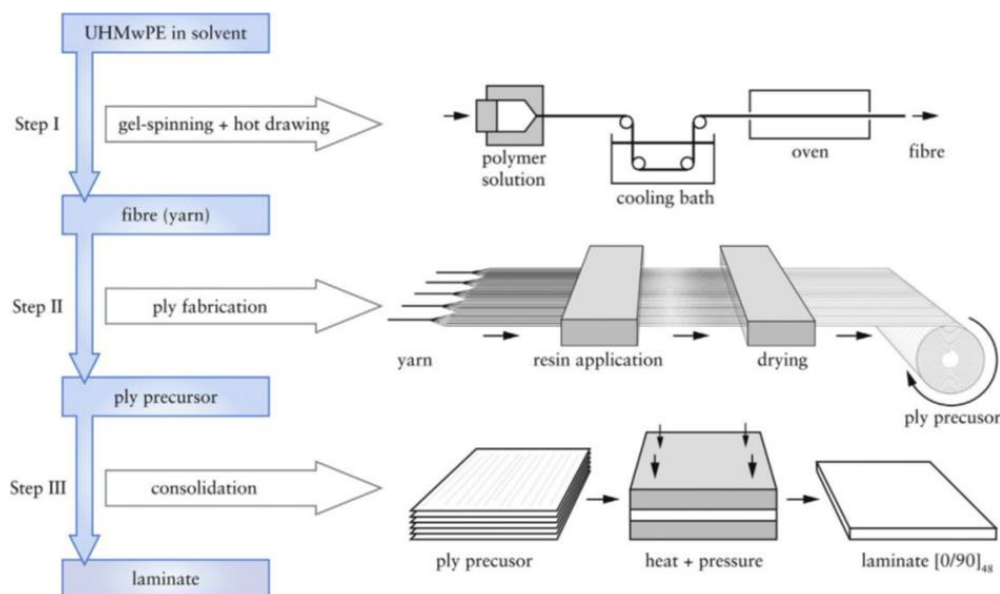
Rys. 38. Bilans energii absorbowanej przez pięciowarstwową strukturę 3DAWF dla prędkości uderzenia pocisku 273.1 m/s [81]

Wśród nich energia tarcia stanowi aż 76% energii kinetycznej pocisku. Z kolei energia kinetyczna i odkształceń sprężystych nitek osnowy wynosiła 9% a wątku 15%.

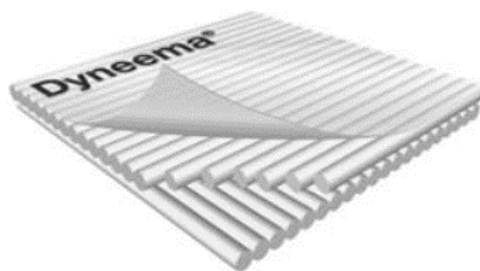
2.2.3.2. Struktury nietkane UD

Tworzenie nietkanych struktur jednokierunkowych UD polega na sprasowaniu przynajmniej dwóch skrzyżowanych pasm równolegle ułożonych włókien polietylenowych UHMWPE (Rys. 39) [82] lub para-aramidowych. Zwykle układa się cztery pasma włókien w układzie 0/90° i prasuje na gorąco między dwiema foliami, aby wytworzyć końcowy elastyczny laminat. Konfiguracja przekroju poprzecznego struktury UD wykazała, że średnica włókien w pasmach nie zmienia się w wyniku operacji prasowania na gorąco [82]. Komercyjne laminaty UD stosowane do ochrony balistycznej to Spectra Shield® (włókna UHMWPE), Gold Shield® (włókna para-aramidowe), K-Flex® (włókna para-aramidowe) firmy Honeywell oraz Dyneema® UD (włókna UHMWPE) firmy DSM (Rys. 40). Laminaty balistyczne UD są zaprojektowane tak, aby były wysoce skuteczne w powstrzymaniu zagrożeń balistycznych, takich jak pociski lub odłamki bomb, granatów i pocisków. Jednokierunkowa orientacja włókien zapewnia laminatowi wysoki stosunek wytrzymałości

do masy, ponieważ włókna są ułożone w kierunku przewidywanego obciążenia, zapewniając maksymalną odporność na penetrację przy jednoczesnej minimalizacji wagi i grubości.



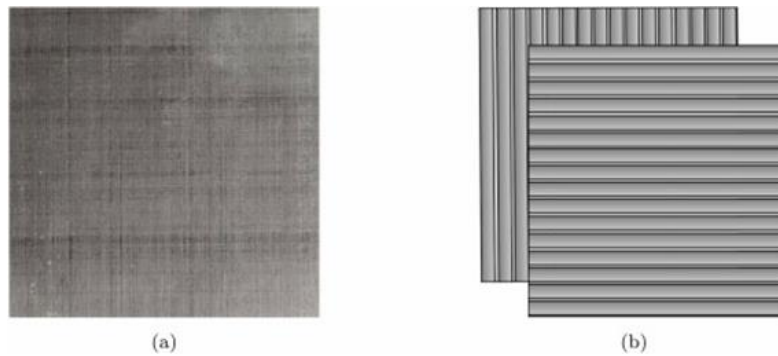
Rys. 39. Schemat poglądowy etapów obróbki podczas wytwarzania laminatu Dyneema® HB 26 [82]



Rys. 40. Laminat UD Dyneema firmy DSM® [82]

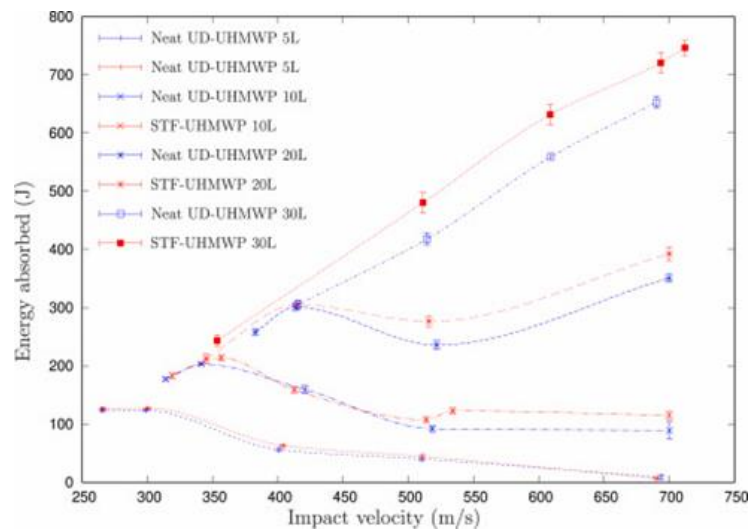
Zastosowanie żywicy termoutwardzalnej zwiększa wytrzymałość i sztywność laminatu, pomagając mu przeciwdziałać odkształceniom i zachować właściwości ochronne. Liczbę i układ warstw w laminacie balistycznym UD można zmieniać, aby spełnić określone wymagania dotyczące wydajności. Ogólnie rzecz biorąc, im więcej dodanych warstw, tym większa ochrona balistyczna zapewniana przez laminat. Jednak zwiększa to również wagę i grubość pancerza, co może utrudniać noszenie i ograniczać mobilność.

Poprawę efektywności balistycznej dla laminatu jednokierunkowego UD można uzyskać między innymi dzięki impregnacji tych struktur płynem zagęszczającym się pod wpływem ścinania (STF) [83]. Do badań zastosowano laminat UD-UHMWP w postaci prepregów składających się z dwóch warstw, które były umieszczone pomiędzy folią termoplastyczną i zorientowane w kierunku 0/90, jak pokazano na rys. 41.



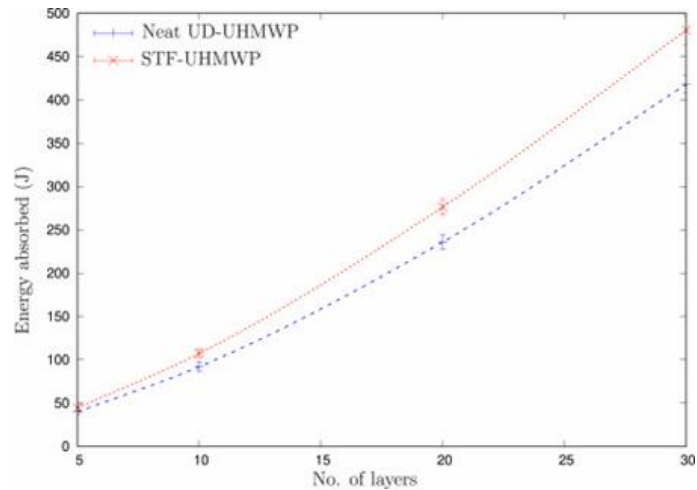
Rys. 41. Prepreg UD-UHMWP: a) widok struktury, b) schemat ułożenia warstw [83]

Do badań przygotowano struktury UD-UHMWP o wymiarach 150 mm × 100 mm, z których następnie przygotowano pakiety składające się z 5, 10, 20 i 30 warstw. Badania balistyczne przeprowadzono za pomocą działka pneumatycznego i pocisków aluminiowych o średnicy 10 mm. Ocenę balistyczną czystych i impregnowanych STF pakietów UD-UHMWP przeprowadzono w zakresie prędkości od 250 do 700 m/s (Rys. 42). Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że panele poddane obróbce STF wykazują większą absorpcję energii kinetycznej pocisku w porównaniu z pakietami zawierającymi struktury nieimpregnowane.



Rys. 42. Zależność energii absorbowanej w funkcji prędkości uderzenia pocisku dla czystych i impregnowanych STF pakietów o różnej liczbie warstw [83]

Zdolność do większego pochłaniania energii przez strukturę UD-UHMWP oraz strukturę UD-UHMWP poddaną obróbce STF uzyskuje się wraz ze wzrostem liczby warstw w pakiecie. Wyniki energii absorbowanej w zależności od liczby warstw w pakiecie dla prędkości uderzenia pocisku 509±10 m/s przedstawiono na rys. 43.



Rys. 43. Energia pochłaniana w zależności od liczby warstw w pakietach ze strukturami UD poddanych obróbce STF i bez obróbki dla prędkości uderzenia pocisku 509 ± 10 m/s [83]

Jak widać na rys. 43, pakiet złożony ze struktur UD-UHMWP poddanych obróbce STF wykazuje większą zdolność do pochłaniania energii w stosunku do pakietu złożonego ze struktur nie poddanych obróbce. Stwierdzono, że dla pakietu składającego się z 30 warstw poddanych obróbce STF, wzrost absorbowanej energii wynosi 13.2 %.

Prowadzono badania numeryczne i eksperymentalne efektywności balistycznej pakietu złożonego z 16 warstw struktur UD Dyneema®SB71 o wymiarach 100 x100 mm ułożonego na podłożu plastelinowym. Pakiet poddano ostrzałowi pociskiem Parabellum 9x19 mm z prędkością uderzenia 365 m/s [84]. Badania numeryczne były realizowane w programie Ansys Autodyn. Warstwy UD modelowano jako powłoki z modelem materiałowym dla elementów skończonych ortotropowym sprężysto-plastycznym. Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że pakiet składający się z 16 warstw struktur UD Dyneema®SB71 zatrzymuje pocisk przy perforacji trzech warstw i deformacji podłoża 37 mm.

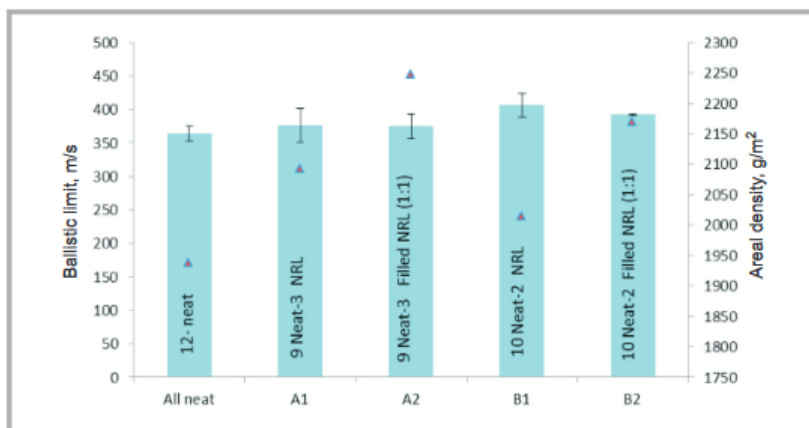
Configurations	Target descriptions	Target characteristic
All neat	Impact direction →	12- neat
A1	Impact direction →	9-neat with 3-NRL
A2	Impact direction →	9-neat with 3- NRL + CaCO ₃ (1:1)
B1	Impact direction →	10-neat with 2-NRL
B2	Impact direction →	10-neat with 2- NRL + CaCO ₃ (1:1)
B3	Impact direction →	10-neat with 2- NRL + CaCO ₃ (7:3)
B4	Impact direction →	10-neat with 2- NRL + CaCO ₃ (9:1)

= Uncoated or = Coated on one surface

Rys. 44. Wariant wykonania pakietów w impregnowanych warstwach UD [85]

Badano możliwości zwiększenia efektywności balistycznej pakietów złożonych ze struktur UD UHMWPE impregnowanych lateksem naturalnym oraz węglanem wapnia [85].

Pakiety były złożone z 12 warstw według wariantów przedstawionych na rys. 44. Dla tak przygotowanych pakietów badano granicę ochrony balistycznej V50 określaną jako prędkość, dla której istnieje 50% prawdopodobieństwo przebicia pakietu odłamkiem standardowym o masie 1.1 g. Na rys. 45 pokazano wyniki badań granicy ochrony balistycznej V50 dla badanych pakietów.



Rys. 45. Prędkość V50 dla badanych pakietów [85]

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że granica ochrony balistycznej V50 dla pakietów z częściowym udziałem warstw modyfikowanych lateksem naturalnym i lateksem naturalnym z węglanem wapnia jest większa niż dla pakietów z warstwami UD niemodyfikowanymi. Największą prędkość V50 wykazuje pakiet zawierający w swojej strukturze dwie warstwy modyfikowane lateksem naturalnym umieszczone w tylnej części pakietu balistycznego.

2.2.3.3. Tkaniny wielosiowe w balistyce

Pierwsze badania oceny efektywności balistycznej pakietów złożonych z tkanin trójosiowych były przeprowadzone w latach 80-tych ubiegłego wieku. Badania eksperymentalne dotyczyły analizy porównawczej pakietów składających się z tkanin dwuosiowych i trójosiowych Nylon 66 [86]. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że minimalna liczba warstw zapewniająca nieprzebicie pakietu z tkanin dwuosiowych jest mniejsza niż dla pakietu z tkanin trójosiowych. Twierdzono, że jest to wynikiem wpływu sześciokątnych otworów w strukturze tkaniny, które nadają jej znaczną ażurowość.

Dalsze badania dotyczyły analizy odporności na przekłucie białą bronią pojedynczych warstw tkanin dwuosiowych i tkanin trójosiowych [87]. W badaniach eksperymentalnych zastosowano następujące obiekty badań:

1. tkanina dwuosiowa z jedwabiu - masa powierzchniowa 65,0 g/m²,
2. tkanina dwuosiowa o nazwie handlowej Kevlar 29 - masa powierzchniowa 431,0 g/m²,

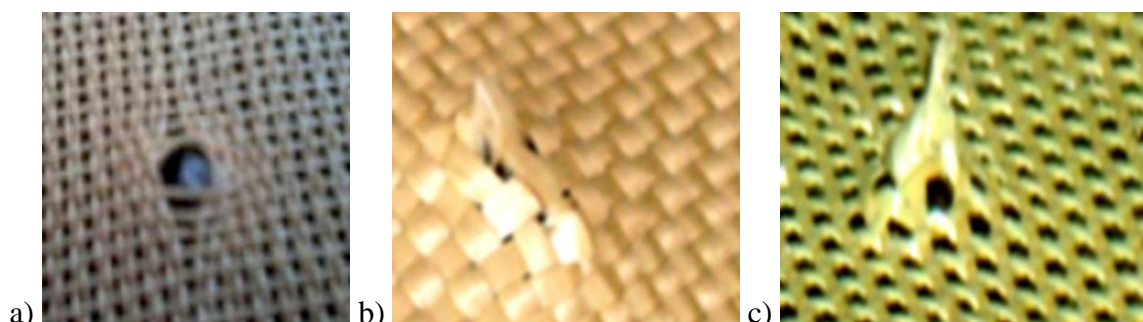
3. tkanina trójosiowa o nazwie handlowej Kevlar 29 - masa powierzchniowa 196,7 g/m²,
4. tkanina trójosiowa z przędzy PES - masa powierzchniowa 166,0 g/m².

Próbki tkanin mocowano w stalowych ramach w kształcie koła. Powierzchnia próbki tkaniny poddana działaniu noża posiadała średnicę 25 mm. Zastosowano obciążenie wynoszące 0.6 kN, a zacisk z zamocowanym nożem przemieszczał się z prędkością 100 mm/min. Na podstawie analizy wyników badań stwierdzono, że w tkaninach dwuosioowych uszkodzeniu ulegają pojedyncze nitki wątku i osnowy w miejscu działania ostrza natomiast pozostałe nitki są rozsuwane. Dla tkanin trójosiowych stwierdzono wzrost wytrzymałości na przebicie o ok. 20% w stosunku do tkanin dwuosioowych. Stwierdzono, że w wyniku wzrostu liczby warstw można zwiększyć odporność na przebicie. Dlatego też zakładano dalszą analizę tkanin dwuosioowych i trójosiowych.

Kontynuacja badań odporności na przebicie białą bronią dotyczyła wyznaczenia wartości sił przebicia dla tkaniny dwuosioowej, tkanin trójosiowych oraz dzianiny [88]. Analizę eksperymentalną przeprowadzono dla:

1. tkaniny dwuosioowej z włókien HTPE,
2. tkaniny trójosiowej o z nitek para-aramidowych Kevlar 29,
3. tkaniny trójosiowej z przędzy PES,
4. tkaniny trójosiowej z nitek para-aramidowych Vectran,
5. dzianiny rządkowej z przędzy PES,
6. dzianiny rządkowej z przędzy PES + 14% włókna Lycra,
7. dzianiny rządkowej z przędzy PES + 16% włókna Lycra.

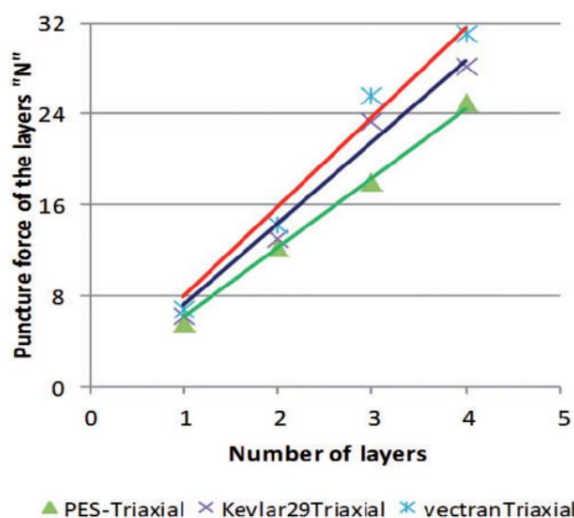
Badania przeprowadzono dla pojedynczych warstw oraz pakietów. Podczas badań nóż zamocowano w ruchomym zacisku na wysokości 600 mm, który następnie uderzał w próbkę z prędkością ok. 3.5 m/s. Przyjęto zakres maksymalnej siły obciążenia do 600 N. Próbki tekstylne umieszczono w stalowych zaciskach o średnicy 150 mm. Kołowa powierzchnia próbki poddana działaniu ostrza noża posiadała średnicę 70 mm. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę organoleptyczną uszkodzeń dla pojedynczych struktur tekstylnych poddanych działaniu nożem (Rys. 46).



Rys. 46. Uszkodzenia badanych struktur tekstylnych: a) dzianina z przędzy PES, b) tkanina dwuosioowa z włókien HTPE, c) tkanina trójosiowa Kevlar 29 [88]

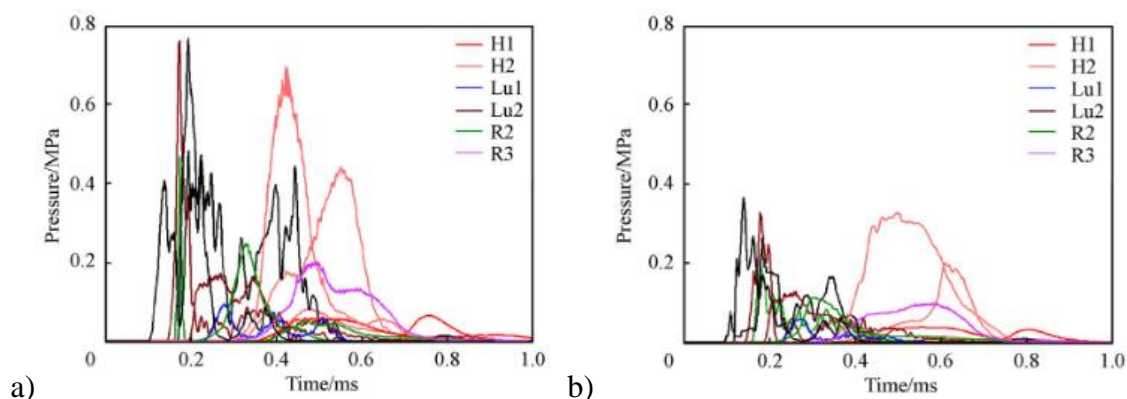
Stwierdzono, że uszkodzenia w dzianinie z przędzy PES oraz w tkaninie dwuosiovej z włókien HTPe obejmują miejsce bezpośredniego oddziaływania ostrza noża. W strukturze tkaniny trójosiowej Kevlar 29 uszkodzenia wystąpiły w miejscu działania ostrza noża i zauważono charakterystyczne przemieszczenie fragmentów uszkodzonych włókien w stosunku do powierzchni tkaniny.

W ostatnim etapie badano siły przebicia dla trzech tkanin trójosiowych w zależności od liczby warstw (Rys. 47). W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że największą odporność na przebicie białą bronią posiadała tkanina trójosiowa Vectran w porównaniu do tkaniny Kevlar 29 i PES. Wzrost liczby warstw w pakiecie przyczyniał się do zwiększenia siły przebicia dla badanych tkanin trójosiowych.



Rys. 47. Siły przebicia w zależności od liczby warstw tkanin trójosiowych [88]

Szczegółowy zakres badań dotyczący odpowiedzi balistycznej pakietów z tkanin dwuosioowych i trójosiowych przedstawiono w pracach [89-91]. Tkaniny dwuosioowa i trójosiowa wykonana była z tego samego surowca Kevlar 29. Przeprowadzono badania eksperymentalne i numeryczne oceny efektywności balistycznej pakietów zróżnicowanych pod względem liczby warstwy i zamocowanych w stalowych ramach. Analizowano również traumę balistyczną BAPT podczas uderzenia pocisku w pakiety osadzone na podłożu balistycznym Roma No.1 oraz z wykorzystaniem żelu balistycznego Clear Ballistic. W końcowym etapie badań opracowano model numeryczny ciała człowieka oraz model fizyczny ciała człowieka, który pozwolił na ocenę obrażeń wewnętrznych podczas niepenetrującego uderzenia pocisku. W badaniach numerycznych i eksperymentalnych zastosowano pocisk Parabellum 9x19 mm FMJ o prędkości uderzenia równej 406 m/s.



Rys. 48. Wykres zależności ciśnienia w funkcji czasu w zależności od czujników zlokalizowanych w sercu (H1,H2) płucach (Lu1, Lu2), żebrach (R2, R3) dla: a) pakietu dwuosioowego Kevlar 29, b) pakietu trójosiowego Kevlar 29 [91]






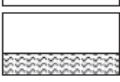
W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że pakiet składający się z 30 warstw tkanin trójosiowych Kevlar® 29 wykazuje mniejszą wartość stożka odkształcenia na podłożu balistycznym Roma No.1 oraz na żelu balistycznym niż przy zastosowaniu pakietu balistycznego z tkanin dwuosioowych Kevlar® 29. W oparciu o badania numeryczne i eksperymentalne wykazano, że ciśnienia wywierane podczas uderzenia pocisku w model ciała człowieka były zawsze mniejsze przy zastosowaniu pakietu z tkanin trójosiowych Kevlar® 29. Na rys. 48 przedstawiono przykładowe wykresy zbiorcze rozkładu ciśnienia w funkcji czasu dla czujników zlokalizowanych w fizycznym modelu ciała człowieka w zależności od pakietu dwuosioowego i trójosiowego po uderzeniu w mostek.

2.3. Wpływ struktury pakietu na efektywność balistyczną osłony

2.3.1. Układy hybrydowe pakietów balistycznych

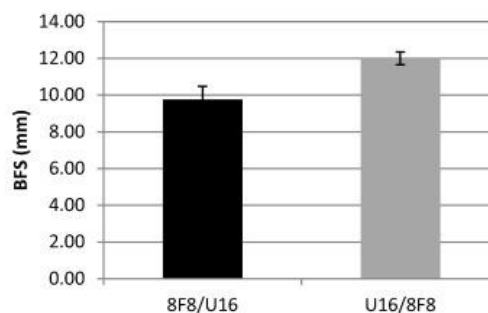
Konstrukcje hybrydowe pakietów balistycznych stanowią istotny kierunek w rozwoju kamizelek kuloodpornych. Wybór materiału i ułożenie warstw każdej fazy w hybrydowym pakiecie balistycznym decyduje o jego efektywności balistycznej. Przy projektowaniu układu hybrydowego należy opierać się na różnych właściwościach balistycznych każdego elementu. Dlatego właściwości balistyczne, w tym zalety i wady dotyczące odporności balistycznej materiałów, powinny zostać zidentyfikowane przed ich zastosowaniem w układach hybrydowych.

W hybrydowych pakietach balistycznych bardzo często łączy się struktury tkane ze strukturami jednokierunkowymi UD. Efektywność balistyczną takich pakietów badano poprzez połączenie laminatów UD Dyneema SB71 i tkaniny Twaron [92]. Specyfikacje materiałowe badanych pakietów balistycznych przedstawiono na rys. 49.

Sample	Layering up sequence	The number of layers	Areal density (g/m ²)
7U ₉		9	1682.46
7U ₂₀		20	3738.80
7U/8F		2	342.13
8F/7U		2	342.13
7U ₃ /8F ₃		6	1029.69
8F ₃ /7U ₃		6	1029.69
8F ₈ /7U ₁₆		24	4248.80
7U ₁₆ /8F ₈		24	4248.80

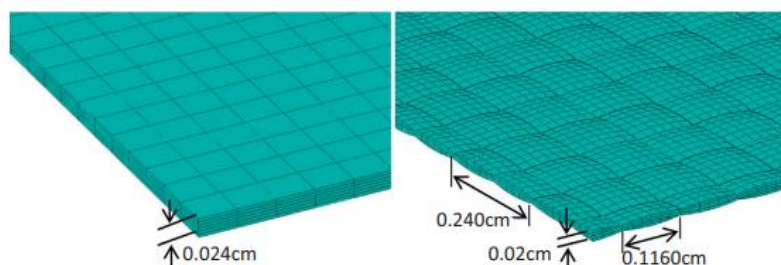
Rys. 49. Specyfikacje materiałowe pakietów balistycznych (Dyneema UD jest oznaczona symbolem 7U a tkanina Twaron jako 8F) [92]

Pakiety balistyczne były badane zarówno metodą eksperymentalną jak i metodą elementów skończonych z wykorzystaniem oprogramowania ABAQUS/Explicit. Testy balistyczne przeprowadzono przy pomocy stalowego cylindrycznego pocisku o średnicy i wysokości 5.5 mm oraz masie 1 g. Prędkość uderzenia pocisku wynosiła w przedziale 470 – 500 m/s. Przy pomocy kamery Photron FASTCAM SA1 rejestrowano proces uderzenia w pakiety balistyczne a obszary deformacji wybranych warstw po uderzeniu pocisku analizowano za pomocą mikroskopu optycznego Projectina CCD-1300PQC. Analiza uzyskanych zdjęć wykazała, że uszkodzenia termiczne były dominującą przyczyną uszkodzeń warstw Dyneema UD. Występowały one w pierwszych warstwach pakietu, gdzie następował kontakt czoła pocisku z powierzchnią pakietu. W przypadku tylnych warstw w panelu UD zniszczenie następowało przez rozciąganie włókien UHMWPE. Natomiast dla pakietu, który posiadał na przodzie warstwy tkanin Twaron nie zaobserwowano uszkodzeń termicznych. Badania balistyczne pakietów wykazały, że kiedy Dyneema UD jest umieszczona jako pierwsza, właściwości balistyczne w tym pochłanianie energii i tylne odkształcenie pakietu są mniejsze. Jak pokazano na rys. 50, pakiet 7U₁₆/8F₈ ma o 18.75% większą tylną deformację niż pakiet 8F₈/7U₁₆. Na taki wynik wpływ miało termiczne uszkodzenie włókien UHMWPE podczas uderzenia pocisku, co skutkuje pogorszeniem parametrów wytrzymałościowych.



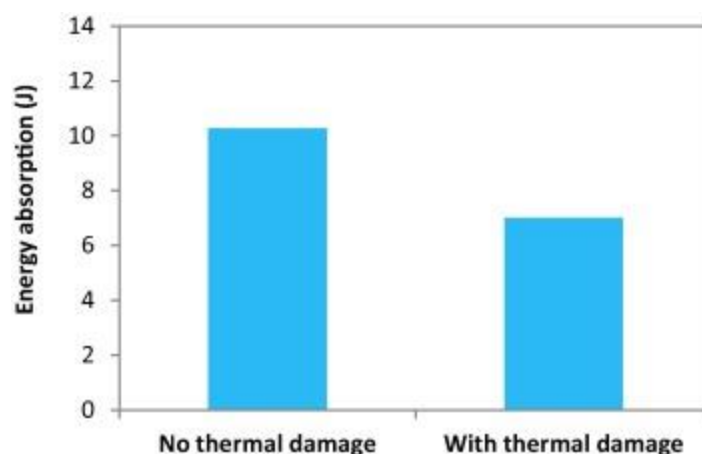
Rys. 50. Wpływ kolejności układania warstw na tylną deformację pakietu [92]

Badania symulacyjne przeprowadzono dla dwóch hybrydowych pakietów balistycznych 7U/8F i 8F/7U. Model laminatu Dyneema UD wykonano w postaci obiektu 3D o grubości 0.24 mm, który podzielono na sześć warstw zorientowanych zgodnie z układem kątowym 0/90° (Rys. 51). Numeryczny model tkaniny odwzorowano na poziomie nitek osnowy i wątku przyjmując grubość tkaniny równą 0.2 mm, szerokość przekroju poprzecznego nitki 1.16 mm oraz okres wrobienia 2.4 mm (Rys. 70).



Rys. 51. Modele numeryczne: a) Dyneema UD, b) tkanina Twaron [92]

Pocisk został zaprojektowany jako sztywny obiekt ze względu na fakt, iż w badaniach eksperymentalnych nie stwierdzono żadnych odkształceń. Pocisk w symulacji miał nadaną prędkość uderzenia 483 m/s. Wyniki symulacji wykazały, że po uwzględnieniu w modelu MES degradacji właściwości materiałowych włókien UHMWPE, nastąpiła szybka perforacja warstwy Dyneema UD podczas uderzenia pocisku. Jak przedstawiono na rys. 52, wydajność balistyczna panelu hybrydowego U/F (UD/Fabric) uległa pogorszeniu wraz ze zmniejszeniem absorpcji energii w warstwie Dyneema UD.



Rys. 52. Wykres energii absorbowanej przez pakiet U/F w badaniach numerycznych [92]

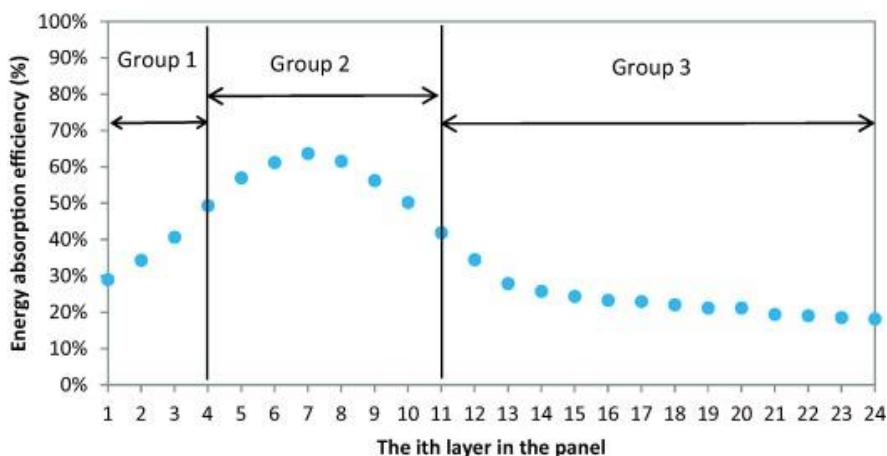
Dalsza kontynuacja badań numerycznych i eksperymentalnych miała na celu zbadanie wpływu poszczególnych warstw pakietu na jego efektywność balistyczną [93]. Badanie podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie wykonano badania numeryczne, gdzie testom balistycznym poddano pakiety składające się z samej tkaniny Twaron. W drugim etapie opracowano dwa hybrydowe pakiety balistyczne opierając się na wynikach z pierwszego etapu prac. W badaniach użyto dwóch tkanin Twaron (11F i 13F) o różnej gęstości splotów

z tą samą przędzą 93tex. Laminaty Dyneema UD SB71 zastosowano jako komponent paneli hybrydowych (U). W ramach badań opracowano trójwymiarowe modele MES pakietów balistycznych poddanych poprzecznemu uderzeniu pocisku w oprogramowaniu ABAQUS/Explicit. Do uderzania w pakiety balistyczne użyto stalowego pocisku Right Circular Cylinder (RCC), który miał średnicę i wysokość 5.5 mm oraz masę 1 g. Prędkość uderzenia pocisku wynosiła 483 m/s.

Material	Sample	The number of layer	Areal density (g m^{-2})
Twaron fabric panel	11F	1	196.85
	11F ₁₅	15	2952.75
	11F ₂₄	24	4724.40
	11F ₃₆	36	7086.60
	11F ₄₈	48	9448.80
Hybrid panel	13F ₃ /11F ₇ /U ₁₄	24	4750.39
	13F ₃ /11F ₇ /U ₅	15	3067.93

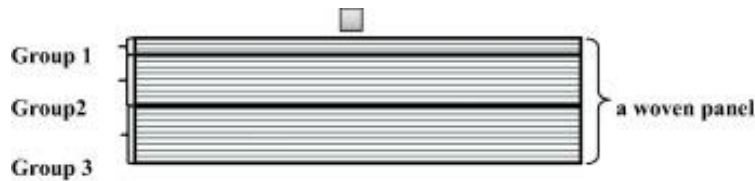
Rys. 53. Warianty pakietów balistycznych użytych w badaniach eksperymentalnych [93]

W badaniach numerycznych zastosowano tkaninę o splocie płóciennym Twaron 11F. W celu zweryfikowania modelu MES przeprowadzono testy eksperymentalne. Przygotowano serię pakietów, w tym pakiety tkaninowe Twaron i dwa zaprojektowane pakiety hybrydowe, jak pokazano na rys 53. W badaniu eksperymentalnym posłużono się stalowym pociskiem RCC o średnicy i wysokości 5.5 mm i wadze 1.004 g, który osiągał średnią prędkość uderzenia 483 m/s. Na znormalizowanym podłożu plastelinowym mierzono jego deformację w celu oceny efektywności balistycznej pakietów. W oparciu o wyniki z badań numerycznych i eksperymentalnym udało się określić efektywność pochłaniania energii przez poszczególne warstwy pakietu balistycznego. Stwierdzono, że wszystkie warstwy tkaniny mają niższą efektywność pochłaniania energii w porównaniu z pojedynczą warstwą. W szczególności efektywność pochłaniania energii przez niektóre warstwy z przodu i z tyłu pakietu jest mniejsza niż 50% (Rys. 54).



Rys. 54. Efektywność pochłaniania energii przez poszczególne warstwy pakietu Twaron 11F24 [93]

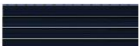









Na podstawie otrzymanych wyników pakiet balistyczny został podzielony na trzy grupy. Przednie trzy warstwy zaliczono do pierwszej grupy. Druga grupa obejmowała kilka warstw środkowych w pobliżu ostatniej warstwy perforowanej. Wszystkie warstwy tylne zaliczono do ostatniej grupy (Rys. 55).



Rys. 55. Schemat podziału warstw pakietu [93]

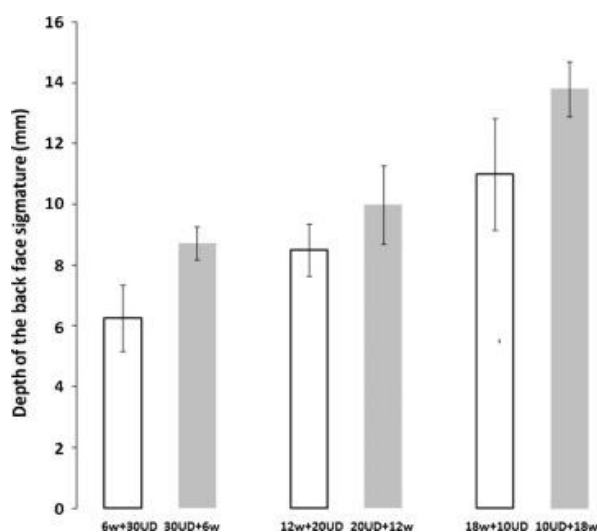
Warstwy tkanin w tych trzech grupach wykazały różne właściwości balistyczne tj. odkształcenia poprzecznego i rozkładu naprężeń. Stwierdzono, że przy projektowaniu pakietu hybrydowego należy pamiętać, że różne wymagania balistyczne istotne z punktu widzenia doboru materiału są określone w poszczególnych pozycjach pakietu. W oparciu o te zasady zaprojektowano dwa pakiety hybrydowe, będące połączeniem różnych tkanin Twaron i laminatów Dyneema UD. Testy balistyczne potwierdziły pozytywny wpływ układu pakietu hybrydowego na właściwości balistyczne. Dla danej gęstości powierzchniowej pakietu hybrydowego tylna deformacja zmniejszyła się o 31.54% niż w przypadku pakietu z tkanin. Gdy gęstość powierzchniowa pakietu była zmniejszona, pakiet hybrydowy miał większe prawdopodobieństwo zatrzymania pocisku.

Podobne badania mające opracować wytyczne do projektowania hybrydowych pakietów balistycznych zostały przeprowadzone dla tkaniny polietylenowej o splocie płóciennym Dyneema SK75 oraz laminatów UD Dyneema SB21 [94]. Badania podzielono na trzy etapy. W pierwszym etapie zbadano reakcje różnych warstw tkaniny w panelu na uderzenie balistyczne. Badania były przeprowadzone symulacyjnie oraz eksperymentalnie. W drugim etapie podjęto pracę mającą na celu wskazania materiałów, które najlepiej spełnią wymagania co do każdej z warstw pakietu balistycznego. W trzecim etapie opracowano pakiety hybrydowe w oparciu o wyniki z dwóch poprzednich etapów. Komputerowe symulacje balistyczne były wykonane w programie FE ABAQUS. Model pocisku miał kształt walca o średnicy i wysokości 5.5 mm oraz masie 1 g. Był on identyczny jak pocisk używany przy badaniach eksperymentalnych. W symulacji jak i eksperymentalnie pocisk uderzał z prędkością 500 m/s. Na podstawie wyników badań eksperymentalnych i symulacyjnych MES uznano, że struktury tkane wykazują lepszą odporność na ścinanie, a struktury UD dają lepszą wytrzymałość na rozciąganie i mniejsze ugięcie poprzeczne po uderzeniu pocisku. Zgodnie z opracowanymi wytycznymi zaprojektowano panele hybrydowe z wykorzystaniem tych dwóch rodzajów struktur (Rys. 56).

Type A panel	Panel model	Areal density (g/m ²)	Type B panel	Panel model	Areal density (g/m ²)
40 layers of UD fabric		5,800	24 layers of woven fabric		5,760
6 layers of woven fabric + 30 layers of UD fabric		5,790	10 layers of UD fabric + 18 layers of woven fabric		5,770
12 layers of woven fabric + 20 layers of UD fabric		5,780	20 layers of UD fabric + 12 layers of woven fabric		5,780
18 layers of woven fabric + 10 layers of UD fabric		5,770	30 layers of UD fabric + 6 layers of woven fabric		5,790
24 layers of woven fabric		5,760	40 layers of UD fabric		5,800

Rys. 56. Warianty pakietów hybrydowych wykorzystane do badań [94]

Badania eksperymentalne wykazały, że umieszczenie tkaniny w przedniej części pakietu hybrydowego zapewnia lepszą ochronę balistyczną niż w odwrotnej kolejności. Na rys. 57 przedstawiono porównanie głębokości deformacji tylnej powierzchni panelu dla wybranych wariantów hybrydowych pakietów balistycznych. Potwierdzono, że zawsze, gdy tkanina umieszczona jest na froncie pakietu balistycznego zapewnia lepsze wyniki niż w kolejności odwrotnej. W końcowych wnioskach stwierdzono, że w ramach tych badań opracowano wytyczne dotyczące projektowania pakietów i przeanalizowano wpływ ścinania i rozciągania struktur tkanych i UD na pochłanianie energii pod wpływem uderzenia balistycznego. Połączenie hybrydowe tych struktur w odpowiedniej kolejności, pozwala na zwiększenie efektywności balistycznej pakietów.



Rys. 57. Głębokość deformacji tylnej powierzchni panelu dla wybranych wariantów hybrydowych pakietów balistycznych [94]

Podobny zakres badań dotyczący oceny odporności balistycznej poszczególnych warstw w hybrydowym pakiecie balistycznym omówiono w pracy [95]. Również w tych badaniach głównie skupiono się na przednich warstwach hybrydowego pakietu balistycznego, które są narażone na uszkodzenia termiczne podczas uderzenia pocisku.

Do wykonania paneli hybrydowych wybrano różne rodzaje materiałów balistycznych, w tym laminaty UD (UHMWPE UD, aramid UD, PBO UD), tkaniny (para-aramidowa, poliimidowa) oraz włókninę (UHMWPE filc włókninowy) (Rys. 58-59).

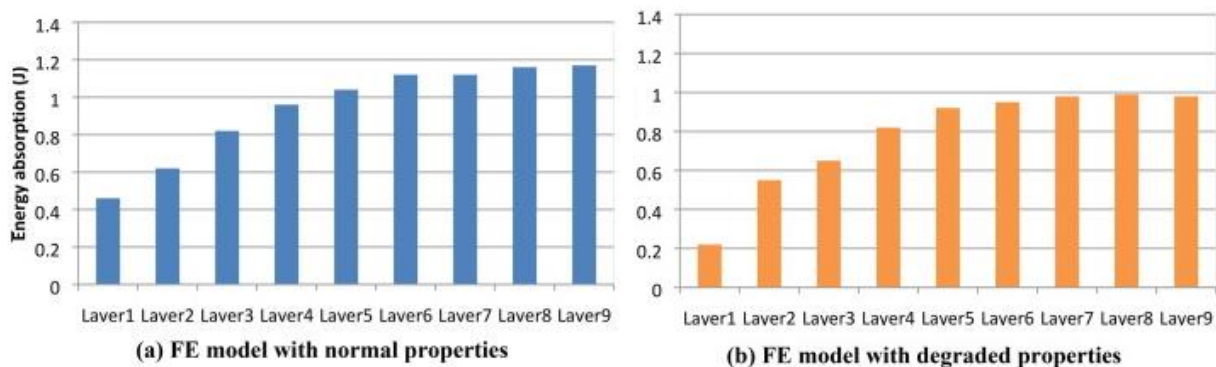
Classification	Material	Code	Areal density (g/m ²)	Thickness (mm)
Uni-directional laminates	UHMWPE UD (Dyneema SB71)	PE	185	0.24
	Aramid II UD	AII	220	0.30
	Aramid II UD (Golden Flex)	GF	230	0.24
	Aramid III UD (Heterocyclic para-aramid)	AIII	240	0.30
	PBO UD	PBO	195	0.20
Woven fabrics	Aramid fabric	AW	196	0.24
	Polyimide fabric	PIW	208	0.32
Non-woven felt	UHMWPE Non-woven felt	PE-NW	344	0.90

Rys. 58. Wykaz materiałów [95]

Material	Number of layers	Areal weight (g/m ²)	Weight variation (%)
PE ₉	9	1665	/
AII ₈	8	1760	5.71
AII ₁ /PE ₈	1/8	1700	2.10
AII ₂ /PE ₇	2/7	1735	4.20
AII ₄ /PE ₄	4/4	1620	-2.70
AII ₆ /PE ₂	6/2	1690	1.50
AIII ₇	7	1680	0.90
AIII ₁ /PE ₈	1/8	1720	3.30
AIII ₂ /PE ₇	2/7	1775	6.61
AIII ₄ /PE ₄	4/4	1700	2.10
AIII ₆ /PE ₁	6/1	1625	-2.40
GF ₇	7	1610	-3.30
GF ₁ /PE ₈	1/8	1710	2.70
GF ₂ /PE ₇	2/7	1755	5.41
GF ₄ /PE ₄	4/4	1660	0.30
GF ₆ /PE ₂	6/2	1750	5.11
PBO ₂ /PE ₇	2/7	1687	1.32
AW ₂ /PE ₇	2/7	1685	1.20
PIW ₂ /PE ₇	2/7	1705	2.40
PE-NW ₁ /PE ₇	1/7	1639	-1.56

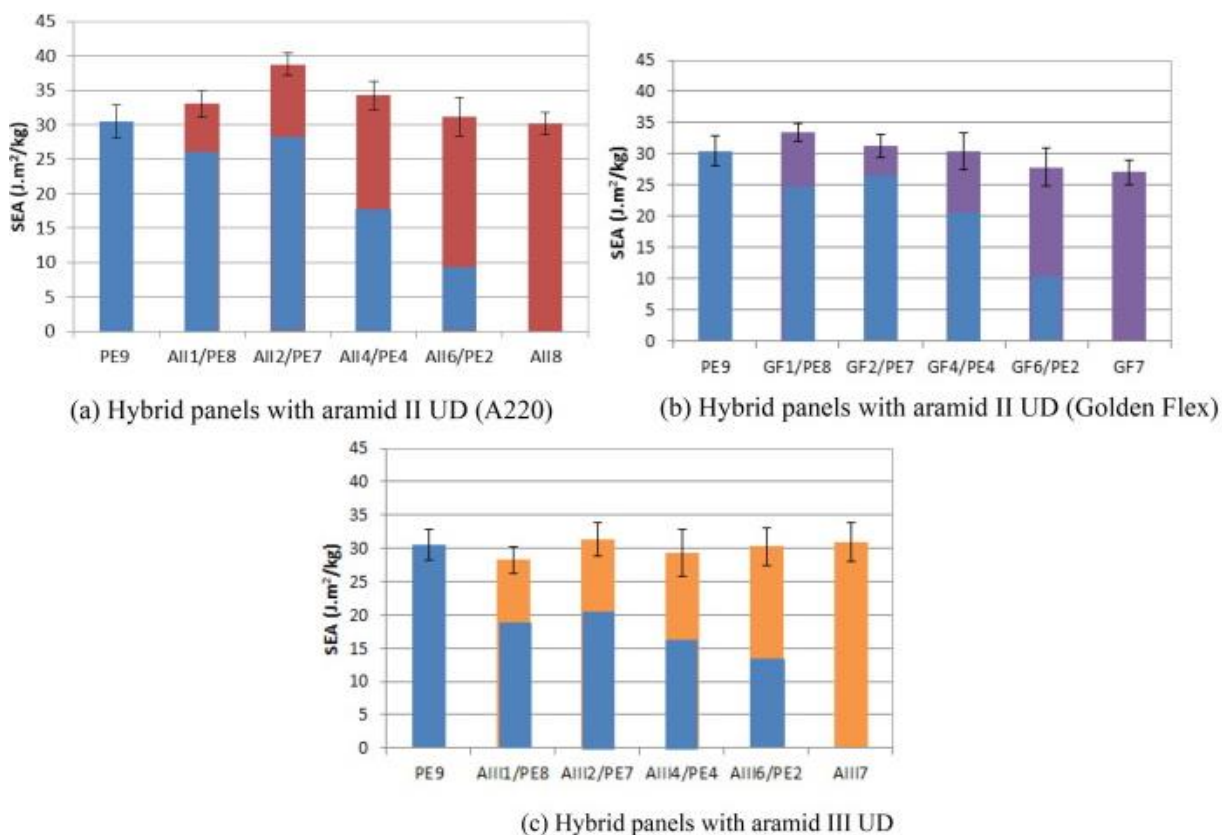
Rys. 59. Specyfikacja hybrydowych pakietów balistycznych [95]

Przygotowane hybrydowe pakiety balistyczne poddano badaniom balistycznym przy pomocy stalowego cylindrycznego pocisku o średnicy i wysokości 5.5 mm i masie 1.1 g. Prędkość uderzenia mieściła się w przedziale 460 - 500 m/s. Do każdego z pakietów oddano po pięć strzałów. Proces uderzenia pocisku był rejestrowany przy pomocy kamery Phantom V1212. W celu weryfikacji odpowiedzi balistycznej pakietu hybrydowego opracowano model numeryczny UHMWPE-UD. Model numeryczny analizowano pod względem prędkości resztkowej, czasu potrzebnego do przestrzelenia oraz wielkości ugięcia poprzecznego. W testach balistycznych średnia prędkość uderzenia wynosiła 483 m/s. W pierwszym etapie zbadano odpowiedź balistyczną pakietu UHMWPE-UD podczas zjawiska perforacji. Zgodnie z wynikami badań symulacyjnych i eksperymentalnych zauważono, że w pakiecie UHMWPE-UD warstwy znajdujące się przednim obszarze są wrażliwe na uszkodzenia termiczne. Po uwzględnieniu parametrów zniszczenia dla warstw UHMWPE-UD w modelu numerycznym, nastąpiło pogorszenie jego właściwości, co skutkowało krótszym czasem pęknięcia całego pakietu i zmniejszeniem ilości pochłanianej energii przez każdą z warstw (Rys. 60).



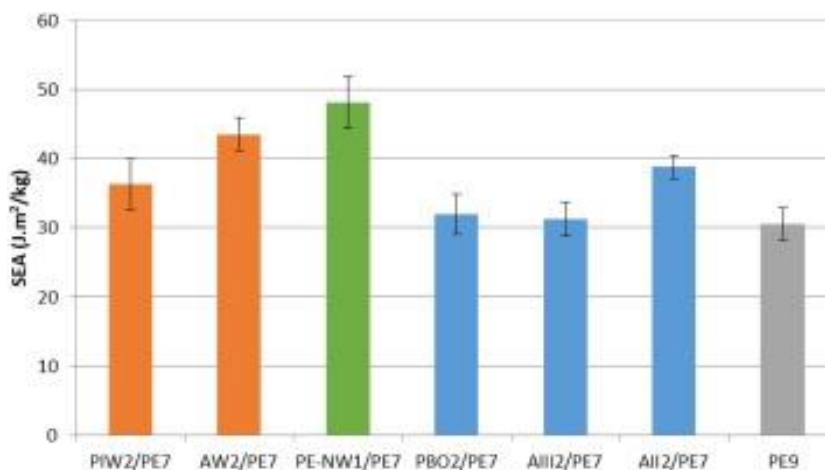
Rys. 60. Absorpcja energii przez każdą z warstw w pakiecie UHMWPE-UD: a) bez uwzględnienia kryterium zniszczenia, b) z uwzględnieniem kryterium zniszczenia [95]

W kolejnym etapie badań z przodu pakietu umieszczono różne rodzaje laminatów UD, tkanin i filcu włókninowego. W porównaniu z referencyjnym panelem UHMWPE-UD, gdy zastąpiono przednią jedną lub dwie warstwy aramidową strukturą UD, absorpcja energii przez pakiety hybrydowe była wyższa niż w przypadku jednolitego pakietu PE₉. Jak pokazano na rys. 61 dla pakietu hybrydowego AII₂/PE₇ synergiczna energia absorpcji (SEA) wzrosła o 27.09% w porównaniu z jednolitym pakietem PE₉ i AII₈. Dla pakietu hybrydowego GF₁/PE₈, SEA wzrosła o 9.58% w porównaniu z pakietem jednorodnym PE₉ i o 23.19% niż w przypadku pakietu AII₈.



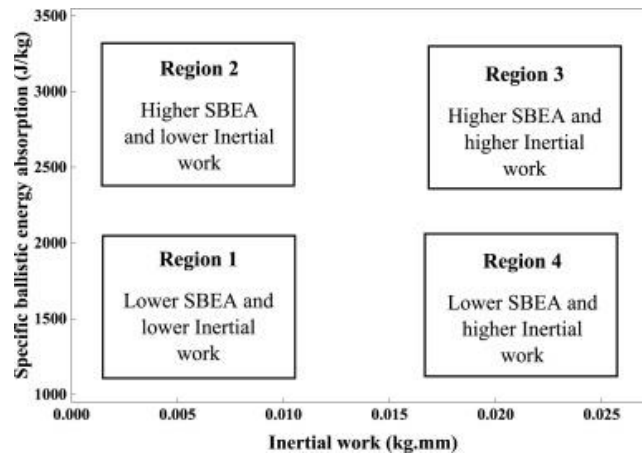
Rys. 61. Synergiczna absorpcja energii dla pakietu jednolitego oraz pakietów hybrydowych [95]

W końcowym etapie badań po połączeniu w pakiety hybrydowe tkaniny aramidowej i włókniny UHMWPE, absorpcja energii wzrosła prawie o 20%. W szczególności, gdy włóknina została umieszczona z przodu, specyficzna absorpcja energii panelu hybrydowego (PE-NW₁/PE₇) wzrosła o 57.76% (Rys. 62).



Rys. 62. Synergiczna absorpcja energii przez pakiety hybrydowe [95]

W innej pracy przedstawiono podejście do opracowania hybrydowego pakietu balistycznego przy założeniu, że będzie się on charakteryzował dużą zdolnością do pochłaniania energii kinetycznej pocisku przy niższym odkształceniu tylnej strony pakietu [96]. W tym celu w pierwszym etapie wprowadzono dwa pojęcia tj. „praca bezwładności”, którą zdefiniowano jako iloczyn masy pakietu i odkształcenia tylnej części oraz pojęcie specyficznej absorpcji energii balistycznej (SBEA) - czyli energii balistycznej pochłoniętej na jednostkę masy pakietu. Głównym celem badań było określenie optymalnej sekwencji układania warstw w pakiecie, tak aby zmaksymalizować SBEA i jednocześnie zminimalizować pracę bezwładności. Przeprowadzono serie badań numerycznych, którą podzielono na dwie części. W pierwszej części uzyskano odpowiedź balistyczną pojedynczej warstwy dotyczącą SBEA i pracy bezwładności w zakresie symulowanej prędkości uderzenia pocisku. W drugiej części pracy opracowano numeryczny ośmiowarstwowy model pakietu tekstylnego ujednoczonego na poziomie nitki. Wielowarstwowy pakiet z tkaniny składał się z różnych kombinacji trzech materiałów tkaninowych rozważanych w badaniach: Kevlar 29 (K), Zylon AS (Z) i Spectra 1000 (S). W badaniach numerycznych przyjęto założenie, że odpowiedź tkaniny na uderzenie balistyczne można podzielić na cztery obszary (Rys. 63). Reakcja na uderzenie balistyczne w Regionie 1 i Regionie 3 była częściowo akceptowalna, ponieważ pozwala osiągnąć jeden cel, podczas gdy w Regionie 4 dawała najgorszą możliwą reakcję balistyczną. Zatem badania numeryczne dla wielowarstwowych i wielomateriałowych pakietów hybrydowych miały określić optymalną sekwencję warstw w pakiecie, która mieści się w Regionie 2. Badania numeryczne realizowano w oprogramowaniu ABAQUS. Przyjęto jako warunek brzegowy, że wszystkie cztery krawędzie pakietu będą zamocowane. Prędkość uderzenia pocisku wynosiła 400 m/s.



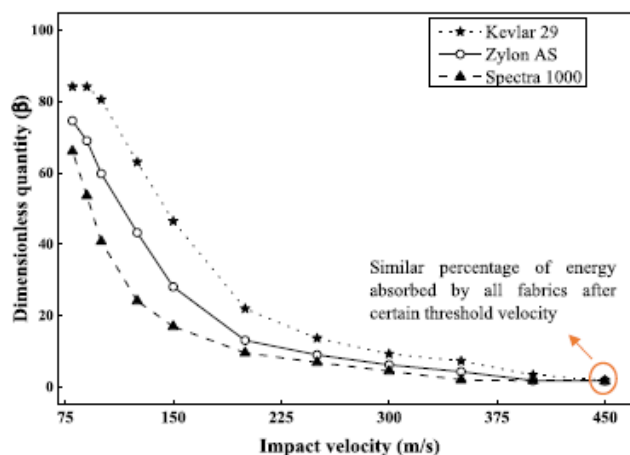
Rys. 63. Reakcja balistyczna pakietu podzielona na różne regiony na podstawie specyficjnej absorpcji energii balistycznej (SBEA) i pracy bezwładności [96]

Do badań zastosowano wszystkie trzy struktury materiałowe przyjęte do badań, które zostały wykorzystane do opracowania pakietów składających się ośmiu warstw. Zaproponowano 36 różnych kombinacji ośmiowarstwowego hybrydowego pakietu, przy założeniu, że każdy materiał stanowił co najmniej 25% wszystkich warstw. Po przeanalizowaniu wyników zaproponowano jeszcze kilka kombinacji co dało łącznie 45 wariantów (Rys. 64).

Sr. no	Combinations	Sr. no	Combinations	Sr. no	Combinations
1	2Z_2S_4K	19	2K_3S_3Z	37	5K_1Z_2S
2	2K_2S_4Z	20	2Z_3S_3K	38	5K_2Z_1S
3	2Z_2K_4S	21	2Z_3K_3S	39	6K_1Z_1S
4	2S_2K_4Z	22	2S_3K_3Z		
5	2K_2Z_4S	23	2K_3Z_3S	40	2K_4S_2K
6	2S_2Z_4K	24	2S_3Z_3K	41	2S_4K_2S
				42	4K_4S
7	2S_4K_2Z	25	3K_2Z_3S	43	4S_4K
8	2Z_4K_2S	26	3S_2Z_3K	44	5K_3S
9	2S_4Z_2K	27	3S_2K_3Z	45	6K_2S
10	2K_4Z_2S	28	3Z_2K_3S		
11	2K_4S_2Z	29	3Z_2S_3K		
12	2Z_4S_2K	30	3K_2S_3Z		
13	4K_2S_2Z	31	3K_3Z_2S		
14	4Z_2S_2K	32	3S_3Z_2K		
15	4K_2Z_2S	33	3Z_3S_2K		
16	4S_2Z_2K	34	3K_3S_2Z		
17	4Z_2K_2S	35	3S_3K_2Z		
18	4S_2K_2Z	36	3Z_3K_2S		

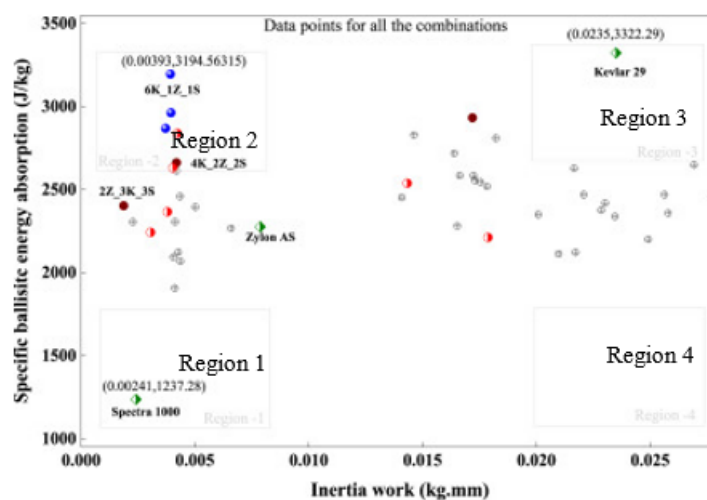
Rys. 64. Wielowarstwowe i wielomateriałowe pakiety hybrydowe [96]

Badania numeryczne dla pojedynczych warstw zostały przeprowadzone przy prędkościach ostrzału w zakresie od 80 do 450 m/s. Odpowiedź balistyczna trzech tkanin o różnych gęstościach przy różnych prędkościach uderzenia była kalibrowana przez bezwymiarową wielkość β wyrażoną w procentach (Rys. 65).



Rys. 65. Bezwymiarowa wielkość β w zależności od prędkości uderzenia pocisku dla pojedynczych warstw [96]

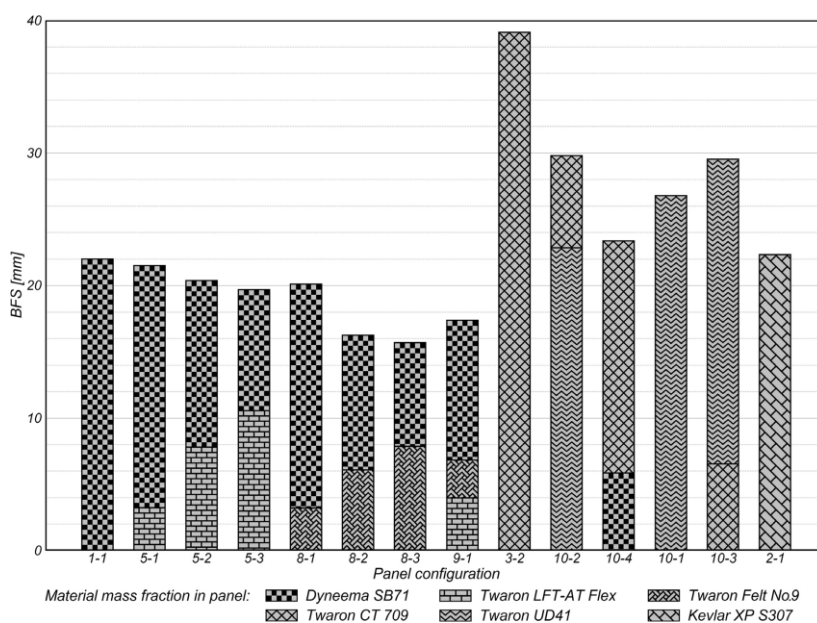
Stwierdzono, że istnieje znaczna różnica w energii balistycznej pochłanianej przez różne tkaniny przy niższej prędkości uderzenia, a różnica ta maleje wraz ze wzrostem prędkości uderzenia. Na podstawie analizowanych wyników badań numerycznych zauważono, że wartość SBEA i pracy bezwładności uzyskane dla tkaniny Kevlar 29 i Zylon AS klasyfikuje się w Regionie 3, natomiast Spectra 1000 umieszczona została w Regionie 1. W wyniku przeprowadzonych badań numerycznych dla wielowarstwowych i wielomateriałowych pakietów hybrydowych stwierdzono, że wartości SBEA i pracy bezwładnościowej różnią się znacznie dla badanych wariantów (Rys.66).



Rys. 66. Specyficzna absorpcja energii balistycznej i wartości pracy bezwładnościowej dla wszystkich 45 kombinacji [96]

W przypadku 2 S_4 K_2Z, gdzie Spectra 1000 jest umieszczona w pierwszych warstwach od czoła pocisku, następnie Kevlar 29 w środku i Zylon AS w tylnej części prowadziło to do wyższych wartości SBEA i wysokiej pracy bezwładności. Natomiast dla wariantu 2Z_3 K_3S otrzymano minimalną wartość pracy bezwładności i stosunkowo niską SBEA. Spośród 45 przypadków składających się z różnych sekwencji układania w pakiety i kombinacji materiałów, 4 K_2Z_2 S skutkowały stosunkowo wyższym SBEA i niską pracą bezwładności. W końcowych wnioskach stwierdzono, że pakiet hybrydowy o najlepszej SBEA i niskiej wartości pracy bezwładnościowej powinien składać się w pierwszej kolejności z tkaniny Kevlar 29, następnie z tkaniny Zylon AS a w ostatnich warstwach powinien posiadać tkaniny Spectra 1000.

Badania eksperymentalne efektywności balistycznej hybrydowych miękkich pakietów balistycznych prowadzono z użyciem sześciu różnych struktur jak: jednokierunkowe struktury UD Dyneema SB7 i Twaron UD41, tkanina dwuosiowa Twaron CT 709, tkanina wieloosiowa Kevlar XP S307, struktura kompozytowa Twaron LFT-AT Flex oraz filc Twaron Felt No. 9 [97]. Badania eksperymentalne przeprowadzono z użyciem pocisku Tokariew 7.62×25 mm FMJ. Całkowita masa ołowianego rdzenia i płaszczka ze stali pokrytej miedzią wynosiła 5.5 g. Pociski wystrzelivano z pistoletu TT a ich prędkości mieściły się w przedziale 475.4 – 499.3 m/s. Do badań balistycznych przygotowano pakiety o wymiarze 200×200 mm, które osadzone były na podłożu plastelinowym Roma No. 1. Na rys. 67 przedstawiono porównanie 14 wybranych pakietów homogenicznych i hybrydowych o ustalonej masie pakietu ok. 250 g. Dodatkowo każdy słupek jest podzielony na sekcje o różnym wzorze, zgodnie z udziałem masowym poszczególnych materiałów dla pakietów hybrydowych.

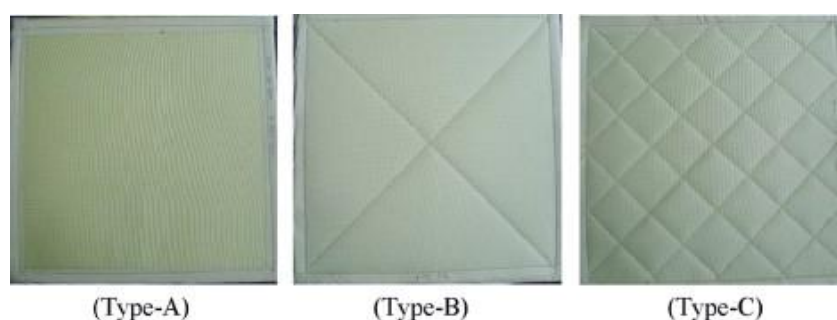


Rys. 67. Głębokość deformacji podłoża plastelinowego w zależności od zastosowanego pakietu [97]

Na podstawie wyników badań eksperymentalnych stwierdzono, że pakiety hybrydowe z warstwami zmniejszającymi skalę urazu jak Twaron LFT-AT Flex, mogą zmniejszyć deformację tylnej części pakietu o około 10% w porównaniu z pakietami homogenizowanymi. Przykładowo dla pakietu składającego się z 15 warstw Dyneema SB71 i 7 warstw Twaron LFT-AT Flex (symbol na wykresie 5-3) maksymalna deformacja podłoża plastelinowego wynosiła 19.7 mm. Stwierdzono również, że pakiety hybrydowe z materiałem filcowym Twaron Felt No. 9 były kilkakrotnie grubsze niż pozostałe testowane konstrukcje, co uznano za wadę takiego rozwiązania pomimo uzyskania małych deformacji podłoża plastelinowego dla tego typu pakietów.

2.3.2. Przeszywane pakiety balistyczne

Badania oceny efektywności balistycznej pakietów w zależności od sposobu ich przeszycia były prowadzone w warunkach eksperymentalnych z użyciem tkanin para-aramidowych [98]. Pakiety o wymiarze 31x31 cm były złożone z 20, 22, 24, 26, 28, 30 i 32 warstw tkaniny Twaron CT 710. Pakiety po złożeniu przeszzywano trzema różnymi typami sposobami z użyciem nici z włókien para-aramidowych (Rys. 68).

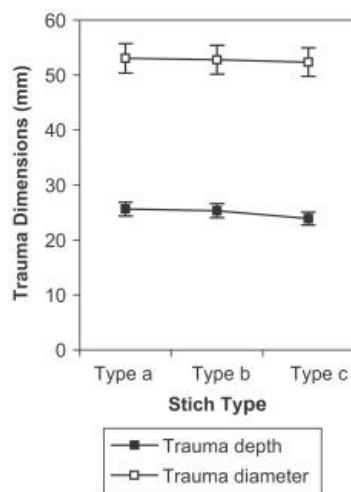


Rys. 68. Widok przygotowanych pakietów przed ostrzałem: Typ A) przeszycie 2.5 cm od brzegów, Typ B) przeszycie 2.5 cm od brzegów i po przekątnych, Typ C) przeszycie 2.5 cm od brzegów a następnie diamentowo co 5 cm [98]

Testy balistyczne prowadzono przy użyciu pistoletu MP5 i pocisków o masie rdzenia 8 g i średnicy 9 mm z prędkością uderzenia 360 m/s, zgodnie z normą NIJ 0101.03. Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że rodzaj przeszycia zastosowanego w pakietach ma wpływ na jego efektywność balistyczną. Stwierdzono zmniejszenie głębokości deformacji podłoża plastelinowego o 6.7% przy zastosowaniu przeszycia Typu C w porównaniu do przeszycia Typu A dla 26 warstw tkaniny (Rys. 69). Zauważono, że duża gęstość przeszycia pakietu zwiększyła jego sztywność.

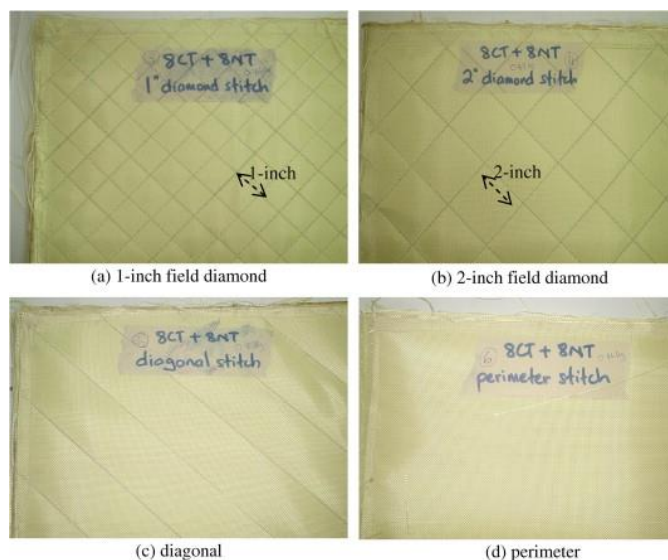
Podobny zakres badań był realizowany z użyciem pakietów złożonych z tkanin para-aramidowych Kevlar 29, również powlekanych gumą, gdzie analizowano wpływ sposobu przeszycia pakietów balistycznych na jego efektywność balistyczną [99]. Do testów przygotowano pakiety w układzie naprzemiennym: warstwa tkaniny Kevlar 29, warstwa

tkaniny Kevlar 29 impregnowana gumą. Wykonano również pakiet składający się z czystych tkanin Kevlar 29, który pozwolił na przeprowadzenie analizy porównawczej uzyskanych wyników badań. Pakiety przesztywane były nicią para-aramidową (Rys. 70). Do badań przygotowano pakiety składające się z 24, 26, 28, 32 warstw.



Rys. 69. Wykres wartości głębokości deformacji i średnicy jamy dla pakietów składających się z 26 warstw tkaniny w zależności od badanych typów przeszycia [98]

Testy balistyczne przeprowadzono zgodnie ze standardem NIJ-0101.04 przy zastosowaniu pocisku Parabellum 9 mm FMJ o prędkości uderzenia w zakresie 407 - 420 m/s. Po ostrzale analizowano głębokość deformacji podłoża plastelinowego Roma No. 1.



Rys. 70. Widok pakietów przed badaniami balistycznymi po przeszyciu: a) diamentowym co 2.5 cm, b) diamentowym co 5 cm, c) przeszycie ukośne co 5 cm, d) dokoła pakietu [99]

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych stwierdzono, że największa wartość deformacji podłoża plastelinowego wystąpiła przy pakiecie o przeszyciu diamentowym co 5 cm i co 2.5 cm, odpowiednio 26 i 23 mm. Dla dwóch pozostałych pakietów, wartość deformacji była taka sama i wynosiła 17 mm.

2.4. Podsumowanie przeglądu literatury

Przegląd literatury obejmował przede wszystkim przegląd publikowanych prac z zakresu zwiększenia efektywności balistycznej tekstylnych pakietów poprzez modyfikację struktury warstw oraz hybrydowe układy warstw w tych pakietach. Na podstawie przeglądu literatury sformułowano następujące wnioski:

1. Struktury balistyczne charakteryzują się wysokimi właściwościami wytrzymałościowymi przy zachowaniu niskiej masy. Prowadzone prace naukowe mają na celu poprawę właściwości wytrzymałościowych włókien i zwiększenie ich efektywności balistycznej.
2. W literaturze brak jest doniesień o stosowaniu na miękkie osłony balistyczne struktur haftowanych. Popularnymi strukturami tekstylnymi stosowanymi na miękkie osłony balistyczne są: tkaniny, struktury UD, włókniny, tkaniny wieloosiowe oraz dzianiny.
3. Popularnym splotem stosowanym w tkaninach balistycznych jest splot płócienny, który charakteryzuje się zdolnością do przenoszenia naprężeń przez nitki wątku i osnowy kontaktujące się z czołem pocisku. Tkaniny balistyczne o splotie płóciennym osiągają większe wartości deformacji poprzecznej niż struktury UD, co jest wynikiem wrobienia nitek i mniejszej propagacji fali naprężeń z uwagi na przeplataną strukturę. Natomiast struktury UD, które wykonane są z rozprostowanych nitek o odpowiednim kącie ułożenia w arkuszach, charakteryzują się zdolnością do przenoszenia naprężeń z większą prędkością, a brak przeplotów prowadzi do ograniczenia deformacji poprzecznej pakietu podczas uderzenia pocisku. Struktury haftowane w swojej budowie są zbliżone do struktur UD.
4. Aktualnie układy hybrydowe są jednym z najpopularniejszych podejść do poprawy efektywności balistycznej miękkiego pakietu balistycznego. Publikowane badania eksperymentalne i numeryczne wykazały, że łączenie w pakiecie warstw o różnej strukturze materiałowej wpływa znacząco na poprawę właściwości balistycznych pakietu.

3. CEL I TEZA PRACY

Cel pracy:

Celem pracy jest wytworzenie struktur haftowanych z udziałem przędzy para-aramidowej i ocena efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów z udziałem tych struktur po ostrzale pociskiem Parabellum 9x19 FMJ.

Głównym celem pracy było udowodnienie tezy:

Istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych.

Zakres pracy:

Osiągnięcie sformułowanego celu pracy i udowodnienie tezy pracy wymagało realizacji następującego zakresu badań:

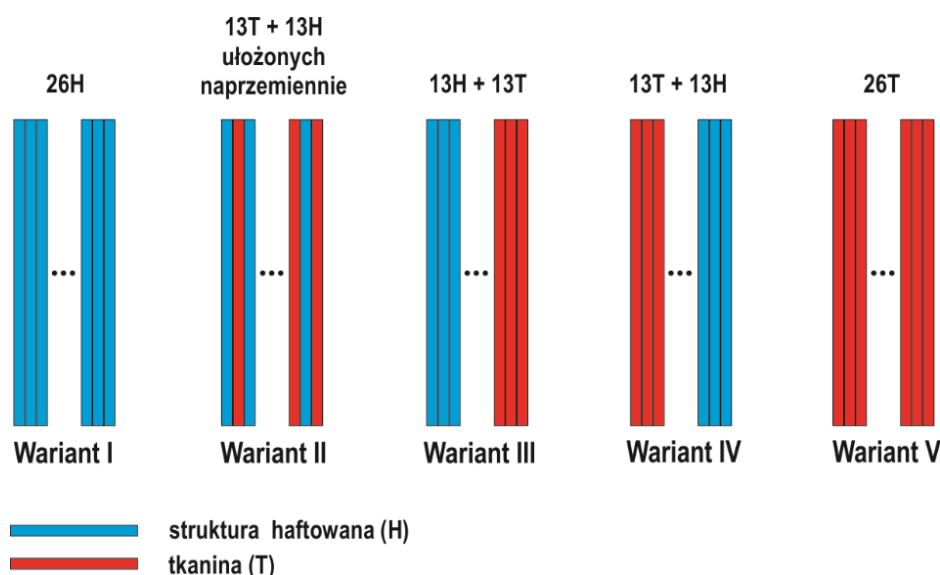
1. Wytworzenie struktur haftowanych z udziałem nitek para-aramidowych.
2. Przeprowadzenie badań numerycznych i eksperymentalnych ostrzału pakietów balistycznych, o różnym układzie warstw tkanych i haftowanych, zamocowanych w stalowych ramach.
3. Przeprowadzenie badań eksperymentalnych ostrzału pakietów balistycznych, o różnych układzie warstw tkanych i haftowanych, ułożonych na kalibrowanym podłożu plastelinowym.
4. Przeprowadzenie numerycznych i eksperymentalnych badań optymalizacyjnych w celu znalezienia najbardziej efektywnej struktury pakietu balistycznego z udziałem tkanin i struktur haftowanych.

4. METODYKA BADAŃ NUMERYCZNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

4.1. Założenia wstępne do badań numerycznych i eksperymentalnych

Badania efektywności balistycznej pakietów z udziałem para-aramidowych struktur haftowanych założono realizować numerycznie metodą elementów skończonych za pomocą oprogramowania LS-Dyna (Livermore Software Technology Corporation, USA) oraz eksperymentalnie w Laboratorium Badań Balistycznych na Politechnice Łódzkiej. Po wykonaniu szeregu wstępnych badań dotyczących możliwości wykonania struktur haftowanych, wydajności hafciarki sterowanej numerycznie, oceny mocy obliczeniowej posiadanej stacji roboczej, oceny wyposażenia Laboratorium Badań Balistycznych do badań przyjęto następujące założenia szczegółowe:

1. Założono, że struktury haftowane o wymiarach 20 cm x 20 cm zostaną opracowane i wytworzone za pomocą techniki haftu TFP (Tailored Fibre Placement) poprzez przymocowanie do włókniny polipropylenowej dwóch układów nitek obróconych względem siebie o 90°, z których każdy składa się z równolegle ułożonych i rozprostowanych przędz para-aramidowych Twaron Microfilament 930 tex f1000. Przędze para-aramidowe będą mocowane za pomocą nici hafciarskich o małej masie liniowej.
2. Efektywność balistyczna uzyskanych struktur haftowanych będzie porównywana z efektywnością balistyczną komercyjnie dostępnej tkaniny para-aramidowej Twaron CT709 Microfilament 930 tex f1000 o masie powierzchniowej 200 g/m², wykonanej z tej samej przędzy jaką założono do wykonania struktur haftowanych. Z tego względu licznosc nitek w strukturach haftowanych założono na takim poziomie, aby masa powierzchniowa tych struktur była identyczna jak tkaniny Twaron CT709.
3. Badania efektywności balistycznej będą realizowane numerycznie i eksperymentalnie dla pakietów złożonych z 26 warstw i wykonanych w pięciu wariantach oznaczonych w pracy odpowiednio jako Wariant I, Wariant II, Wariant III, Wariant IV i Wariant V (Rys. 71). Zgodnie ze schematem wykonania pakietów balistycznych przedstawionym na rysunku 71 założono, że Wariant I będzie się składał z 26 warstw wykonanych ze struktur haftowanych, Wariant II – z naprzemiennie ułożonych 13 warstw tkanin i 13 warstw struktur haftowanych, Wariant III – z 13 warstw struktur haftowanych z przodu od strony uderzenia pocisku i 13 warstw tkaniny z tyłu, Wariant IV – z 13 warstw tkaniny z przodu od strony uderzenia pocisku i 13 warstw struktur haftowanych z tyłu i Wariant V – z 26 warstw tkaniny.



Rys. 71. Warianty wykonania pakietów balistycznych

Założenie wykonania pakietów balistycznych w Wariantach I i V wynikało z konieczności bezpośredniego porównania efektywności balistycznej pakietów złożonych w całości ze struktur haftowanych i tkanin. Z kolei założenie wykonania pakietów w Wariantach III i IV, złożonych z 13 warstw struktur haftowanych i 13 warstw tkanin wynikało z konieczności zbadania czy kolejność ułożenia tych warstw względem punktu uderzenia pocisku ma wpływ na efektywność balistyczną pakietów. W przypadku pakietu wykonanego w Wariacie II, w którym warstwy tkanin i struktury haftowane będą ułożone naprzemiennie założono, że w przypadku uzyskania korzystnych własności balistycznych, można rozważyć zlikwidowanie włókniny jako podłoża struktury haftowanej i jej wykonanie bezpośrednio na tkaninie para-aramidowej, co pozwoliłoby na ograniczenie masy powierzchniowej pakietu balistycznego.

4. Założono, że pakiety balistyczne będą ostrzeliwane w warunkach badań numerycznych i eksperymentalnych pociskiem Parabellum 9x19 mm FMJ z prędkością uderzenia 380 m/s.

4.2. Wytwarzanie struktur haftowanych

Struktury haftowane wytwarzano przy użyciu hafciarki JCZA 0109-550 (ZSK Stickmaschinen, Niemcy), wyposażoną w głowicę TFP do układania i przymocowywania struktur liniowych (Rys. 72). Przed przystąpieniem do procesu haftowania, za pomocą dedykowanego dla hafciarek firmy ZSK oprogramowania GiS BasePack version 10 wykonano wirtualny projekt struktury haftowanej do wykonania za pomocą głowicy TFP. W pierwszym etapie projektowania ustalono obszar haftowania 20 cm x 20 cm, rodzaj i parametry mocowania nitki para-aramidowej oraz jej trajektorię układania na ustalonym

obszarze haftowania. Sposób układania nitki para-aramidowej podzielono na dwa etapy. W pierwszym nitka układana jest na obszarze haftowania równolegle od krawędzi do krawędzi z założoną licznością. W drugim etapie identyczny układ nitek przyhaftowywany jest pod kątem 90° w stosunku do pierwszego układu (Rys. 73).



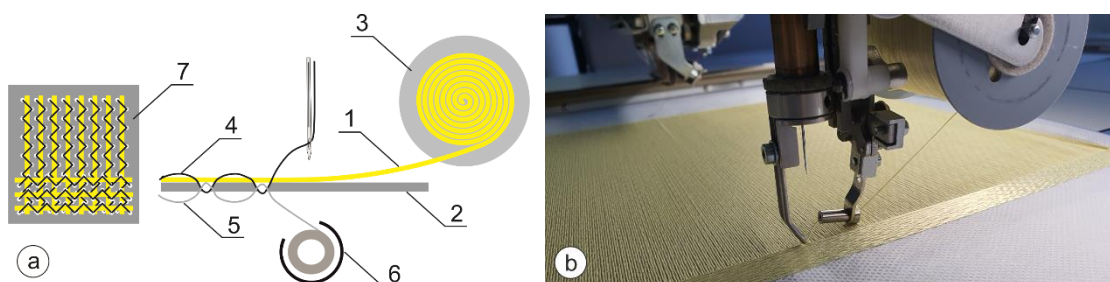
Rys. 72. Widok hafciarki JCZA 0109-550 zastosowanej do wytwarzania struktur haftowanych



Rys. 73. Projekt wirtualny struktury haftowanej

Opracowany projekt struktury haftowanej był przenoszony do pamięci maszyny haftującej i w oparciu o ten projekt wytwarzano rzeczywiste struktury haftowane (Rys. 74). W trakcie wytwarzania struktur haftowanych z przeznaczeniem na warstwy pakietów balistycznych (Rys. 74a), przędza para-aramidowa Twaron Microfilament 930 tex f1000 (1) była podawana z nawoju (3) i przymocowywana nicią górną (4) i nicią dolną (5) do podłoża (2) w postaci włókniny polipropylenowej typu spun-bonded (TEXFIL, Polska) ścięciem

zygzakowym. Masa powierzchniowa zastosowanego podłoża włókninowego wynosiła 80 g/m². Jako nić główną i dolną zastosowano nici TYTAN 360 (Ariadna, Polska) o masie liniowej i wytrzymałości na zerwanie odpowiednio 85 dtex i 480 cN. Skok poprzeczny i wzdłużny igły podczas haftowania ściegiem zygzakowym wynosił odpowiednio 1 i 4 mm. Zgodnie z zaprogramowanym schematem, w pierwszej kolejności maszyna hafciarska mocowała do podłoża pierwszy układ równoległych nitek a następnie drugi układ obrócony pod kątem 90° w stosunku do pierwszego układu (Rys. 74b).



Rys. 74. Wytwarzanie struktur haftowanych: (a) schemat procesu haftowania (1 - przędza para-aramidowa, 2 - podłoże z włókniny polipropylenowej, 3 - nawój z przędzą para-aramidową, 4 - nić górna, 5 - nić dolna 6 - haczyk obrotowy, 7 - struktura haftowana); (b) widok procesu wytwarzania para-aramidowej struktury haftowanej

Liczność nitek para-aramidowych w obu układach nitek wynosiła 108 nitek/dm, którą dobrano eksperymentalnie tak, aby uzyskać masę powierzchniową struktury haftowanej wynikającej z masy przędzy para-aramidowej zbliżoną do masy powierzchniowej tkaniny Twaron CT709. W tym celu ważono nawój z przędzą para-aramidową przed i po wykonaniu struktury haftowanej za pomocą precyzyjnej wagi OHAUS TS400S (OHAUS, USA) i po obliczaniu różnicy uzyskano masę przędzy para-aramidowej zawartej w strukturze haftowanej o wymiarach 20 cm x 20 cm. Dla dobranej ostatecznie licznosci nitek 108 nitek/dm, masa powierzchniowa struktur haftowanych wyniosła 203±5 g/m². Na rys. 75 przedstawiono widok wytworzonej para-aramidowej struktury haftowanej zgodnie z opisaną metodyką.

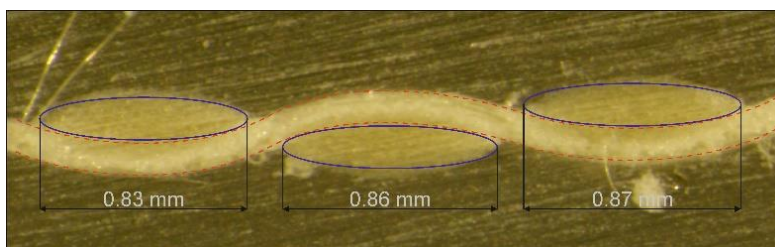


Rys. 75. Widok wytworzonej struktury haftowanej

Na rys. 75. widoczne są dwa układy równoległe ułożonych nitki para-aramidowych, które krzyżują się pod kątem 90° . Nitki para-aramidowe praktycznie są rozprostowane, niewielkie ich zafalowanie wynika z relaksacji po zdjęciu wyrobu z maszyny haftującej. Nici mocujące są praktycznie niewidoczne, bowiem ich średnica jest ok. 10-12 razy mniejsza od średnicy nitki para-aramidowej. Takie struktury wytwarzano dalej jako warstwy pakietów balistycznych.

4.3. Metodyka badań numerycznych

Model geometryczny struktury haftowanej oraz warstwy tkaniny opracowano na podstawie danych katalogowych tkaniny Twaron CT709 [51]. W modelowaniu przyjęto: 1/ stały przekrój poprzeczny nitki w tkaninie i strukturze haftowanej, 2/ wymiary modelowanej struktury haftowanej i tkaniny CT709 równe 20 cm x 20 cm, 3/ masę powierzchniową modelowanej struktury haftowanej i tkaniny równą 200 g/m^2 , co odpowiada rzeczywistej masie powierzchniowej tkaniny Twaron CT709 użytej w badaniach eksperymentalnych, 4/ licznosc nitki w modelowanej tkaninie w osnowie i wątku równą 105 nitki/dm, co odpowiada rzeczywistym licznościom nitki w tych układach w tkaninie Twaron CT709. Biorąc pod uwagę licznosc nitki wątku i osnowy w tkaninie równą $N_w=105$ nitki/dm, podziałka nitki T_t w tej tkaninie wynosi 0.95 mm. Szerokosc nitki, a tym samym szerokosc elipsy modelujacej przekroj poprzeczny nitki w tkaninie, ustalono na podstawie przekrojow poprzecznych uzyskanych po zatopieniu tkaniny w przezroczystej żywicy epoksydowej (Rys. 76).



Rys. 76. Widok przykładowego przekroju poprzecznego tkaniny CT709 z pomierzonymi wartościami szerokości nitki

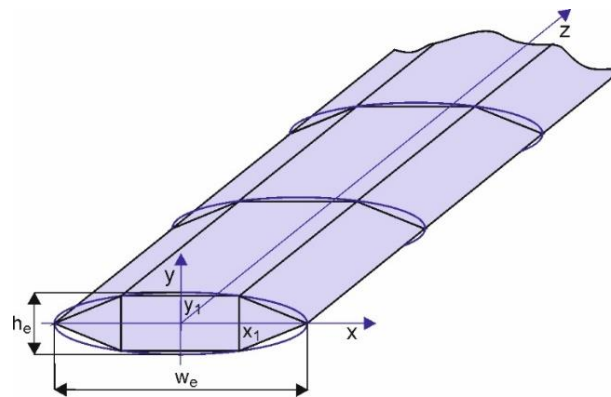
Obrazy widoków poprzecznych po utwardzeniu zatopionej tkaniny wykonywano za pomocą mikroskopu stereoskopowego Olympus SHZ10. Na rys. 76 podano wartości szerokości elipsy modelującej przekrój poprzeczny nitki. Ostatecznie szerokość elipsy w_e przyjęto równą 0.86 mm, którą obliczono na podstawie średniej wartości z 20 pomiarów dokonanych dla szeregu widoków przekrojów poprzecznych tkaniny Twaron CT709. Zgodnie z założeniami, wartość tą przyjęto taką samą dla elips modelujących przekrój poprzeczny nitki w tkaninie i strukturze haftowanej.

Na podstawie danych katalogowych, masa liniowa nitki M , z której wykonana jest tkanina para-aramidowa Twaron CT709 i którą również użyto do wykonania struktur

haftowanych wynosi 93 tex. W celu uzyskania masy powierzchniowej m_s struktury haftowanej równej 200 g/m^2 , licznosc nitki w obu ukkladach struktury mozna obliczyc ze wzoru (16):

$$N_E = \frac{50 \cdot m_s}{M} \quad (16)$$

Po podstawieniu danych licznosc nitki w strukturze haftowanej wynosi $N_E=108$ nitki/dm. Wysokosc elipsy modelujacej przekroj poprzeczny nitki h_e przyjeto tak, aby masa powierzchniowa obliczona dla dyskretnego modelu struktury haftowanej, uwzgledniajac licznosc N_E , wynosila 200 g/m^2 . Biorac pod uwage mozliwosci obliczeniowe dostepnej stacji roboczej, przekroj poprzeczny elipsy modelujacej przekroj poprzeczny nitki w strukturze haftowanej i tkaninie podzielono na trzy elementy skonczone (Rys. 77).



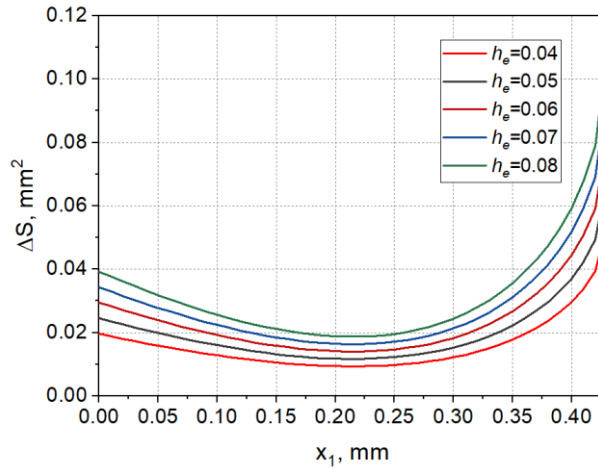
Rys. 77. Podział nitki w strukturze haftowanej na elementy skończone

Podczas dyskretyzacji, algorytm podziału powierzchni elipsy na elementy skończone dobiera wymiary elementów tak, aby różnica pomiędzy powierzchnią elipsy a sumaryczną powierzchnią elementów skończonych była minimalna. Zgodnie z przyjętymi oznaczeniami na rys. 77, powierzchnia elementu skończonego prostokątnego wynosi $S_R=4 \cdot x_1 \cdot y_1$, natomiast elementów skończonych trójkątnych $S_T=x_1 \cdot (\frac{1}{2} \cdot w_e - x_1)$. Biorąc pod uwagę równanie elipsy, dla danej wartości argumentu x_1 wartość y_1 można obliczyć ze wzoru (17):

$$y_1 = h_e \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{x_1^2}{w_e^2}} \quad (17)$$

Z kolei różnicę pomiędzy powierzchnią elipsy a sumaryczną powierzchnią elementów skończonych ΔS można obliczyć ze wzoru (18):

$$\Delta S = \pi \frac{w_e \cdot h_e}{4} - (2S_T + S_R) \quad (18)$$



Rys. 78. Wykres zależności różnicy ΔS od wartości argumentu x_1 dla różnych wartości wysokości elipsy h_e

Na rys. 78 przedstawiono zależność różnicy ΔS od wartości argumentu x_1 zmieniającego się w zakresie od 0 do $w_e/2$ dla różnych wartości wysokości elipsy h_e . Wyniki obliczeń przedstawionych na rys. 78 wskazują, że dla ustalonej wartości szerokości elipsy $w_e=0.86$ mm, różnica ΔS pomiędzy powierzchnią elipsy a sumaryczną powierzchnią elementów skończonych jest zawsze najmniejsza dla tej samej wartości argumentu $x_1=0.21$ mm, niezależnie od przyjmowanych wartości wysokości elipsy h_e . Biorąc pod uwagę wyznaczoną wartość $x_1=0.21$ mm, ze wzoru na masę powierzchniową struktury haftowanej można wyznaczyć wysokość elipsy h_e tak, aby masa ta była równa 200 g/m^2 :

$$m_s = 20\rho \cdot N_E \cdot l \cdot (2S_T + S_R) \quad (19)$$

gdzie ρ jest gęstością para-aramidu wynoszącą 1.44 g/cm^3 , l jest długością nitki równą 100 cm, N_E jest obliczoną liczbą nitek w strukturze haftowanej wynoszącą 108 nitek/dm. Podstawiając do równania (19) wzory na wartość powierzchni S_T i S_R oraz uwzględniając wzór (17) mamy:

$$m_s = 20\rho \cdot N_E \cdot l \cdot \left(x_1(w_e - 2x_1) + 4h_e x_1 \sqrt{\frac{1}{4} - \frac{x_1^2}{w_e^2}} \right) \quad (20)$$

Stąd wysokość elipsy h_e wynosi:

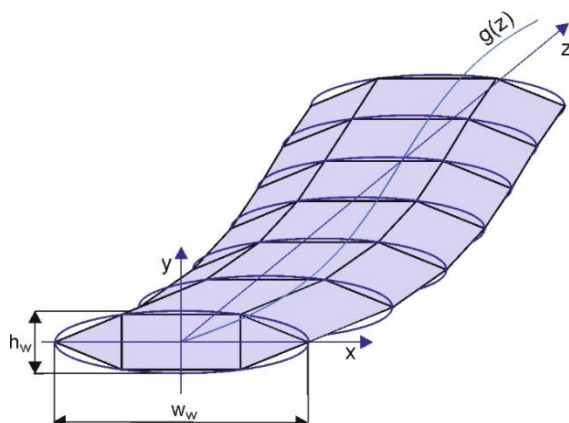
$$h_e = \frac{w_e [m_s - 20\rho \cdot N_E \cdot l \cdot x_1 (w_e - 2x_1)]}{40\rho \cdot N_E \cdot l \cdot 4x_1 \sqrt{w_e^2 - 4x_1^2}} \quad (21)$$

Po podstawieniu danych do równania (21) można wyznaczyć, że masa powierzchniowa struktury haftowanej będzie równa 200 g/m^2 dla wysokości elipsy $h_e=0.115$ mm i taką wartość przyjęto dalej do opracowania całej warstwy struktury haftowanej. Przyjęto podział nitki wzdłuż osi z na 300 segmentów elementów skończonych, biorąc pod uwagę wielkość modelu i możliwości obliczeniowe dostępnych zasobów komputerowych.

W przypadku modelu dyskretnego tkaniny CT709, przyjęto eliptyczny kształt przekroju poprzecznego nitek wątku i osnowy w postaci elipsy o szerokości identycznej jak w strukturze haftowanej $w_w=w_e$. Z kolei zafalowanie nitek wątku i osnowy przyjęto sinusoidalne, zgodnie ze wzorem (22):

$$g(z) = h_w \cdot \sin\left(\frac{\pi \cdot z}{T_t}\right) \quad (22)$$

Na rys. 79 przedstawiono sposób dyskretyzacji nitek wątku i osnowy w tkaninie Twaron CT709.



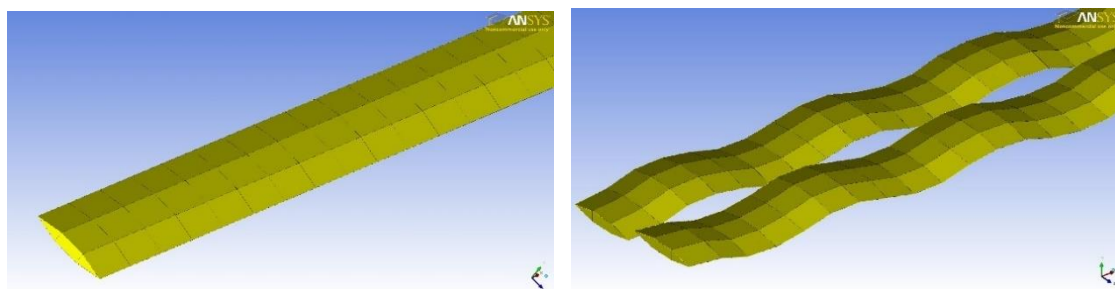
Rys. 79. Sposób dyskretyzacji nitek wątku i osnowy w tkaninie Twaron CT709

Wysokość elipsy h_w dobierano iteracyjnie tak, aby masa powierzchniowa modelu tkaniny Twaron CT709 wynosiła 200 g/m^2 , przy gęstości materiału tworzącego nitkę jak dla paraaramidu 1.44 g/cm^3 . W tym celu, dla przyjętej wysokości elipsy h_w za pomocą oprogramowania Ansys ICEM CFD, generowano model dyskretny nitki o długości 20 cm zafalowanej zgodnie z równaniem (22), przyjmując podział nitki wzdłuż przebiegu sinusoidalnego na 600 segmentów elementów skończonych. Następnie po nadaniu gęstości materiału równej 1.44 g/cm^3 , generowano plik w formacie oprogramowania LS-Dyna. Plik ten następnie otwierano w oprogramowaniu LS-PrePost i za pomocą dostępnych narzędzi odczytywano masę dyskretnego modelu nitki m_d . Na podstawie tej masy obliczano następnie masę powierzchniową modelu tkaniny m_w ze wzoru (23):

$$m_w = 100N_w \cdot m_d \quad (23)$$

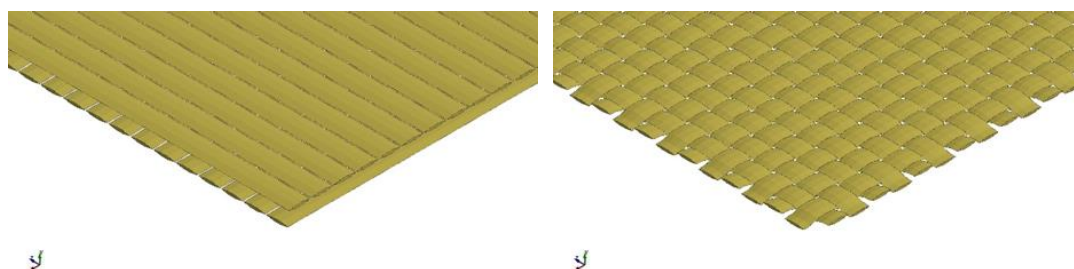
Ostatecznie ustalono, że wysokość elipsy h_w dla której masa powierzchniowa m_w jest równa 200 g/m^2 wynosi 0.122 mm i taką wartość przyjęto do opracowania modelu warstwy tkaniny Twaron CT709.

Na rys. 80 przedstawiono modele dyskretne nitek tworzących modele dyskretne struktury haftowanej i tkaniny Twaron CT709 wygenerowane za pomocą oprogramowania Ansys ICEM CFD zgodnie z przyjętym kształtem i wymiarami przekrojów poprzecznych oraz kształtem zafalowania nitek.



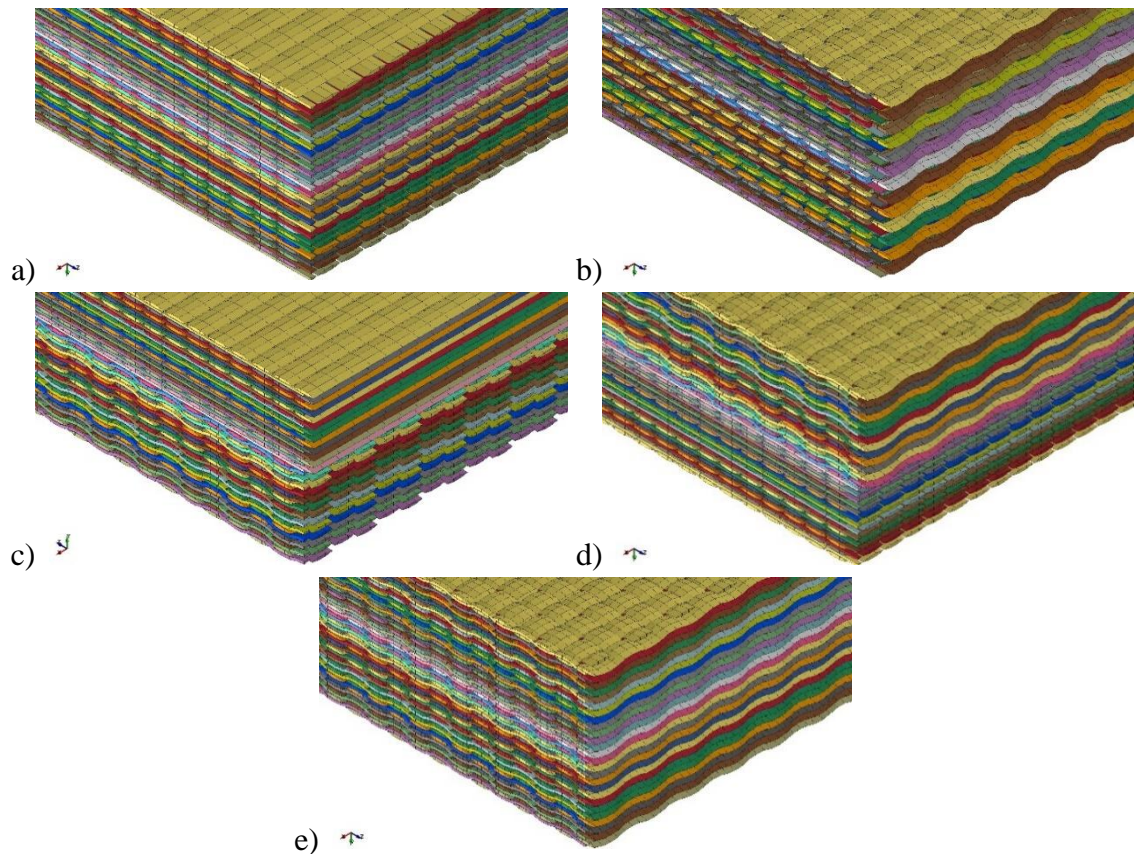
Rys. 80. Modele dyskretne nitki struktury haftowanej i tkaniny Twaron CT709

W kolejnym kroku uzyskano model numeryczny warstwy struktury haftowanej oraz tkaniny Twaron CT709. W tym celu nitkę struktury haftowanej i tkaniny powielono w dwóch układach obróconych o 90° tak, aby liczność nitki wynosiła $N_E=108$ nitki/dm dla struktury haftowanej i $N_W=105$ nitki/dm dla tkaniny Twaron CT709. Opracowany w ten sposób model numeryczny warstwy o wymiarach 20x20 cm w przypadku struktury haftowanej składał się z 396000 elementów skończonych, natomiast w przypadku tkaniny z 756000 elementów skończonych. Na rys. 81 przedstawiono widoki modelu numerycznego fragmentu warstwy struktury haftowanej i tkaniny.



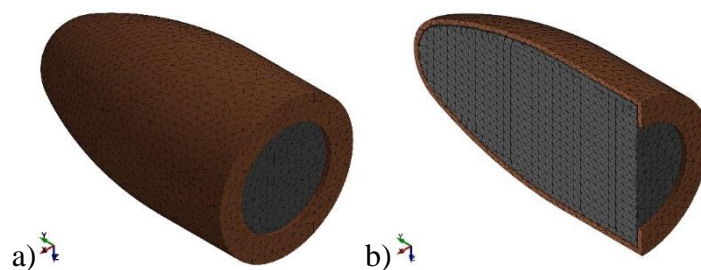
Rys. 81. Model numeryczny fragmentu warstwy struktury haftowanej i tkaniny

Z kolei, na rys. 82 przedstawiono fragmenty widoków modeli pakietów balistycznych wykonanych dla założonych wariantów. Numeryczne modele dla Wariantu II, Wariantu III i Wariantu IV posiadały identyczną liczbę elementów skończonych równą 15057516, z kolei Wariant I posiadał 10377516 elementów a Wariant V 19737516 elementów skończonych.



Rys. 82. Model numeryczny pakietu balistycznego: a) Wariant I, b) Wariant II, c) Wariant III, d) Wariant IV, e) Wariant V

W celu realizacji badań symulacyjnych, w kolejnym etapie opracowano model numeryczny pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ. Model geometryczny tego pocisku opracowano na podstawie danych fabrycznych w oprogramowaniu Geomagic Design X. W modelu geometrycznym uwzględniono rdzeń i płaszcz pocisku. W dalszym etapie, model geometryczny pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ poddano procesowi dyskretyzacji w oprogramowaniu Ansys ICEM CFD. Dla rdzenia i płaszcza wygenerowano siatkę elementów skończonych typu tetra o maksymalnym wymiarze krawędzi 0.5 mm (Rys. 83). Model numeryczny pocisku posiadał w sumie 81516 elementów skończonych.



Rys. 83. Model numeryczny pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ: a) widok kompletnego modelu, b) widok przekroju poprzecznego

Analizy numeryczne uderzenia pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ w wybrany wariant pakietu balistycznego realizowano w programie LS-Dyna. Przed przystąpieniem do obliczeń zdefiniowano modele materiałowe i przyjęto odpowiednie parametry tych modeli. Dla nitki struktur haftowanych i tkanin przyjęto ten sam model materiałowy *MAT_PLASTIC_KINEMATIC z parametrami wytrzymałościowymi jak dla nitki Twaron Microfilament 930 dtex f1000 [51, 101-102]. W tabeli 7 przedstawiono wartości parametrów dla modelu materiałowego *MAT_PLASTIC_KINEMATIC przyjętego dla struktury haftowanej i tkaniny.

Tabela. 7. Wartości parametrów dla modelu materiałowego *MAT_PLASTIC_KINEMATIC przyjętego dla struktury haftowanej i tkaniny

Gęstość RO, kg/m ³	Moduł Younga E, GPa	Współczynnik Poissona PR	Granica plastyczności SIGY, MPa	Odształcenie zrywające FS, %
1440	80	0.3	3.6	0.04

W przypadku pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ przyjęto ten sam model materiałowy dla ołowianego rdzenia i płaszczka pocisku wykonanego z mosiądzu balistycznego typu *MAT_SIMPLIFIED_JOHNOSN_COOK [89, 91]. W tabeli 8 przedstawiono wartości parametrów dla tego modelu dla ołowianego rdzenia, a w tabeli 9 dla płaszczka wykonanego z mosiądzu balistycznego.

Tabela 8. Wartości parametrów dla modelu materiałowego *MAT_SIMPLIFIED_JOHNOSN_COOK przyjętego dla ołowianego rdzenia

Gęstość RO, kg/m ³	Moduł Younga E, Pa	Współczynnik Poissona PR	Stała A	Stała B	Stała N	Stała c
11300	1e+09	0,42	5e+6	4e+7	0,5	0,628

Tabela 9. Wartości parametrów dla modelu materiałowego *MAT_SIMPLIFIED_JOHNOSN_COOK przyjętego dla płaszczka wykonanego z brązu balistycznego

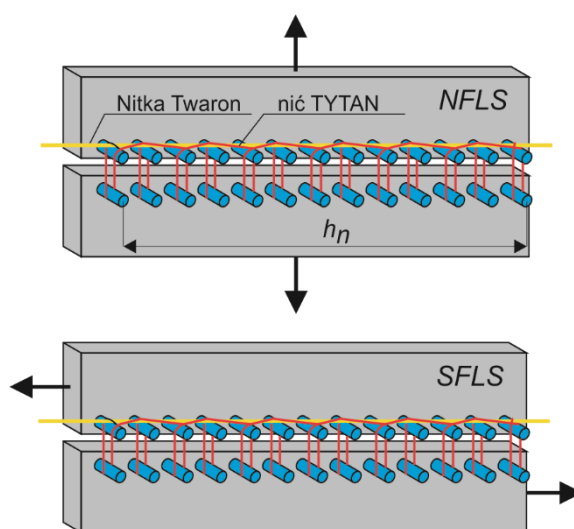
Gęstość RO, kg/m ³	Moduł Younga E, Pa	Współczynnik Poissona PR	Stała A	Stała B	Stała N	Stała c
8940,9	1,3e+11	0,375	112e+6	5050e+5	0,42	0,009

W celu zamodelowania w strukturze haftowanej połączenia nitki z podłożem ściąganiem zygzakowym zastosowano kontakt między nitkami obu układów typu AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE_TIEBREAK. Kontakt ten zastosowano w celu zamodelowania siły wiązania rozprostowanych nitki para-aramidowych do podłoża włókninowego, mocowanych za pomocą nici, bez rzeczywistego modelowania tych nici. To uproszczenie było konieczne z uwagi na z jednej strony skomplikowaną trajektorię nici mocujących a z drugiej, konieczność ograniczenia liczby elementów skończonych w modelu

numerycznym pakiecie balistycznego. Z uwagi na dużą gęstość nici mocujących w strukturze haftowanej, ich uwzględnienie w modelu numerycznym pakietu balistycznego spowodowałoby ogromny przyrost elementów skończonych, uniemożliwiający obliczenie symulacji przez dostępne zasoby komputerowe. Wybrany algorytm kontaktu posiada kilka opcji definiowania niszczenia wiązania. Metodą prób i błędów ostatecznie wybrano algorytm Opcja 2, który wykazywał stabilność podczas obliczeń i generował niszczenie wiązania zgodnie ze wzorem (24) [102]:

$$\left(\frac{\sigma_n}{NFLS}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_s}{SFLS}\right)^2 \geq 1 \quad (24)$$

gdzie σ_n jest obliczonym normalnym naprężeniem rozciągającym, $NFLS$ określonym eksperymentalnie normalnym naprężeniem niszczącym przy rozciąganiu połączenia, σ_s obliczonym naprężeniem ścinającym a $SFLS$ jest określonym eksperymentalnie naprężeniem niszczącym przy ścinaniu połączenia. Gdy lewa strona równania jest większa lub równa 1, wytrzymałość połączenia na rozciąganie i ścinanie jest dezaktywowana a utrzymywane jest jedynie tarcie ślizgowe, zdefiniowane statycznym i dynamicznym współczynnikiem tarcia. Dla modelowanych struktur haftowanych, wartości parametrów $NFLS$ i $SFLS$ określono eksperymentalnie zgodnie z ideą przedstawioną na rys. 84.



Rys. 84. Idea pomiaru wartości parametrów $NFLS$ i $SFLS$ w strukturach haftowanych

Zgodnie z tą ideą, w dwóch płytkach o wymiarach 30 x 60 mm i grubości 10 mm wykonanych z turbaksu, nawiercono w jednej linii 13 otworów o średnicy 0.8 mm w odstępach co 4 mm. Zachowano identyczny odstęp otworów jak przyjęty skok ściegu typu zygzak podczas wytwarzania struktur haftowanych za pomocą hafciarki. W otworach tych umieszczono stalowe igły o średnicy 0.8 mm. Płytki następnie umieszczano w szczękach zrywarki rzędami igieł naprzeciwko siebie. Wykorzystując dwa rzędy igieł, nitkę Twaron Microfilament 930 dtex f1000 zamocowano do górnego rzędu nitek poprzez nić mocującą

TYTAN 360 wykorzystywaną do wytwarzania struktur haftowanych. Sposób przeplatania nici mocującej pomiędzy dwoma rzędami igieł zachowano taki sam, jak w maszynie haftującej podczas przyhaftowywania nitki ścięciem typu zygzak. Tak wykonane połączenie rozrywano i ścinano za pomocą zrywarki Hounsfield-H10Ks (Anglia), rejestrując jednocześnie siłę w funkcji wydłużenia aż do zerwania połączenia. Na podstawie zarejestrowanych wyników pomiarów wyznaczano siłę zrywającą podczas rozrywania F_{fail_N} i ścinania F_{fail_S} połączenia i obliczano wartości $NFLS$ i $SFLS$ ze wzorów (25) i (26):

$$NFLS = \frac{F_{fail_N}}{w_e \cdot h_n} \quad (25)$$

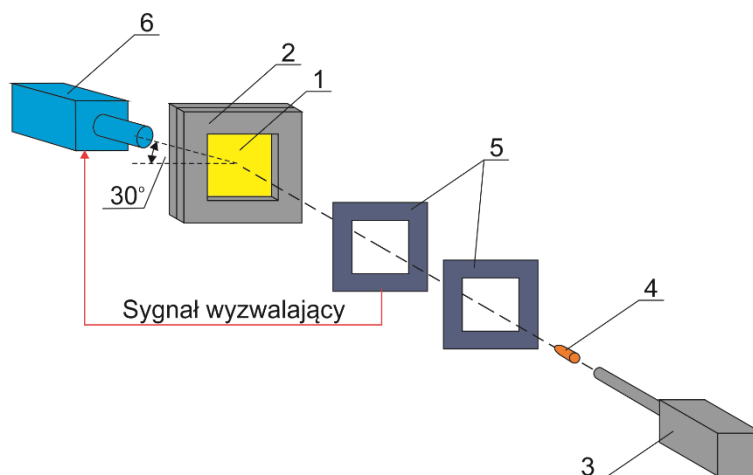
$$SFLS = \frac{F_{fail_S}}{w_e \cdot h_n} \quad (26)$$

gdzie h_n jest odległością pomiędzy skrajnymi igłami.

Ostatecznie wartości $NFLS$ i $SFLS$ ustalono jako średnia wartość z 6 pomiarów dla przyjętych warunków badań eksperymentalnych. Przy modelowaniu kontaktu nitek w warstwie tkaniny oraz pomiędzy warstwami pakietu balistycznego zastosowano kontakt AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE, dla którego zdefiniowano odpowiednie wartości dynamicznego i statycznego współczynnika tarcia wynoszące odpowiednio 0.19 i 0.23 [103-104]. Rodzaj tego kontaktu jest zalecany przy badaniu zjawisk zderzeniowych, w których model ulega bardzo dużym odkształceniom. Badania pakietów prowadzono w warunkach zakleszczenia wszystkich krawędzi warstw. W przypadku kontaktu pocisku z warstwami tkanymi i haftowanymi zastosowano ten sam rodzaj kontaktu ze współczynnikami tarcia statycznego i dynamicznego równe 0.18 [103]. W celu odwzorowania zakleszczenia krawędzi warstw, w badaniach numerycznych zastosowano opcję BOUNDARY_SPC_SET. Węzły krawędziowe wszystkich warstw pakietu balistycznego zamocowano tak, aby nie przemieszczały się w żadnym z kierunków układu współrzędnych xyz .

4.4. Metodyka badań eksperymentalnych

Z wytworzonych struktur haftowanych i zakupionej tkaniny Twaron CT709 wykonano po dwa pakiety dla każdego założonego wariantu o wymiarach 30 cm x 30 cm. Ostrzał pakietów realizowano w Laboratorium Badań Balistycznych na stanowisku przedstawionym schematycznie na rys. 85.



Rys. 85. Schemat stanowiska do badań balistycznych, gdzie: 1 – pakiet balistyczny, 2 – stalowe ramy mocujące, 3 – działo balistyczne, 4 – pocisk, 5 – zestaw bramek do pomiaru prędkości pocisku, 6 – kamera do szybkiej rejestracji

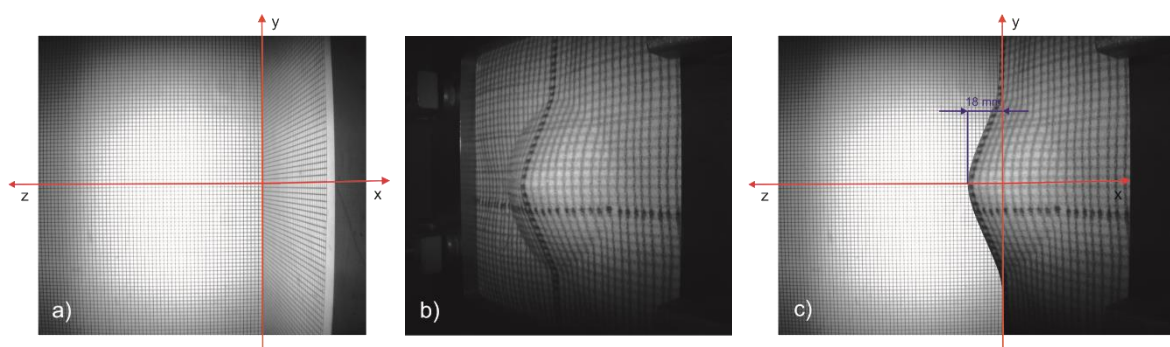
Stanowisko do badań balistycznych składało się z działka balistycznego UPB1 (Fabryka Broni Łucznik Radom, Polska) do wystrzeliwania pocisków Parabellum 9x19, systemu bramek do pomiaru prędkości uderzenia pocisku oraz w kamerę Cordin 550 (Cordin, USA) do obrazowania tylnej strony pakietu balistycznego. Przed ostrzałem badany pakiet balistyczny umieszczano pomiędzy dwoma stalowymi ramami o wymiarach wewnętrznych 20x20 cm, które następnie dociskano do siebie za pomocą ośmiu ścisków umieszczonych po dwa na każdym z boków ram (Rys. 86).



Rys. 86. Widok pakietu balistycznego zamocowanego w ramach stalowych

Ostrzał prowadzono za pomocą pocisków Parabellum 9x19 FMJ (Sellier & Bellot, Czechy), których prędkość uderzenia wynosiła 380 ± 3 m/s, oddając jeden strzał w środek każdego pakietu. W celu lepszego zobrazowania deformacji pakietu balistycznego po uderzeniu pocisku, na tylną stronę pakietu nanoszono siatkę o podziałce 5x5 mm. Podczas

ostrzału rejestrowano sekwencję szesnastu obrazów tylnej części pakietu balistycznego za pomocą kamery Cordin 550 z prędkością rejestracji 12800 obrazów/s. Wartość tą dobrano eksperymentalnie tak, aby w zarejestrowanej sekwencji zobrazować proces deformacji tylnej strony pakietu balistycznego od chwili zetknięcia pocisku z pakietem aż do zatrzymania pocisku. Podczas rejestracji kamera ustawiona była tak, aby oś optyczna obiektywu kamery znajdowała się na wysokości toru lotu pocisku a kąt pomiędzy osią optyczną a płaszczyzną tylnej strony pakietu wynosił ok. 30° (Rys. 85). Kamera była wyzwalana sygnałem generowanym przez jedną z bramek do pomiaru prędkości pocisku. Sygnał ten był generowany w chwili przechodzenia pocisku przez tą bramkę.



Rys. 87. Pomiar deformacji pakietu balistycznego: a) zarejestrowany obraz arkuszy pomiarowych umieszczonych w ramach stalowych, b) zarejestrowany obraz pakietu balistycznego podczas ostrzału, c) pomiar deformacji pakietu poprzez nałożenie obrazów arkuszy pomiarowych i pakietu balistycznego podczas ostrzału.

Dla zarejestrowanych sekwencji obrazów podczas uderzenia pocisku, wyznaczano deformację tylnej strony pakietu balistycznego. W tym celu w ramach stalowych zamocowano dwa sztywne arkusze z nadrukowaną kratką o wymiarach oczka 2×2 mm. Pierwszy arkusz umieszczono w ramach prostopadle do toru lotu pocisku, natomiast drugi pionowo w torze lotu pocisku i prostopadle do pierwszego arkusza. Dla tak zamocowanych arkuszy wykonano rejestrację w pozycji kamery identycznej jak podczas obrazowania pakietów balistycznych (Rys. 87a). Dla zarejestrowanego obrazu pakietu balistycznego podczas uderzenia pocisku (Rys. 87b), deformację pakietu odczytywano poprzez nałożenie tego obrazu na zarejestrowany obraz arkuszy pomiarowych (Rys. 87a), a następnie w układzie współrzędnych yz odczytywano deformację zgodnie z ideą przedstawioną na rys. 87c. Najpierw wyznaczano punkt największego przemieszczenia się pakietu balistycznego względem osi y a następnie odliczano liczbę kratek na osi z , mieszczącej się na odcinku pomiędzy początkiem układu współrzędnych a wyznaczonym punktem. Wartość deformacji ostatecznie obliczano poprzez pomnożenie uzyskanej liczby krater przez 2 mm.

Po ostrzale dla każdego wariantu pakietu balistycznego wyznaczano współczynnik perforacji oraz spłaszczenie pocisku. Współczynnik perforacji P_R obliczano ze wzoru (27):

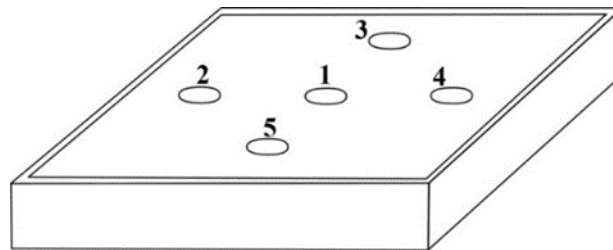
$$P_R = \frac{N_p}{N_t} \cdot 100\% \quad (27)$$

gdzie N_p jest liczbą przestrzelonych warstw w pakiecie balistycznym, natomiast N_t jest całkowitą liczbą warstw w pakiecie balistycznym. Z kolei spłaszczenie pocisku B_E obliczano ze wzoru (28):

$$B_E = \frac{D_d - D_i}{D_i} \cdot 100\% \quad (28)$$

gdzie D_d jest średnicą odkształconego pocisku po uderzeniu a D_i jest początkową średnicą pocisku, która dla wykorzystywanego w badaniach pocisku Parabellum 9x19 FMJ wynosiła 9 mm. W celu określenia średnicy D_d , pociski wyjęte z pakietu balistycznego po ostrzale mierzono suwmiarką w sześciu różnych punktach i wyznaczono wartość średnią.

W ramach realizacji pracy, badano eksperymentalnie efektywność balistyczną pakietów ułożonych na znormalizowanym podłożu plastelinowym i poddanych ostrzałowi pociskiem Parabellum 9x19 FMJ. W tym celu do badań przygotowano podłoże plastelinowe zgodnie z zaleceniami amerykańskiej normy Ballistic Resistance of Personal Body Armour NIJ Standard [105]. Skrzynię o wymiarach 400 mm x 400 mm i głębokości 140 mm wypełniono plasteliną Roma No. 1. Plastelinę poddano następnie kalibracji, polegającej na umieszczeniu skrzyni z plasteliną w piecu o zadanej stabilizowanej temperaturze i wygrzewaniu jej przez 24 godziny a następnie, po jej wyjęciu, zrzucie stalowej kuli o średnicy $63,5 \pm 0,05$ mm i masie 1043 ± 5 g z wysokości 2 m na jej powierzchnię w pięciu miejscach zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 88.



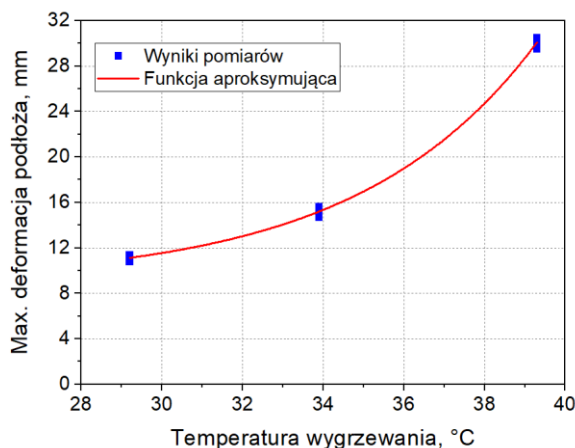
Rys. 88. Rozmieszczenie i kolejność zrzutów kuli na blok plastelinowy [105]

W dalszej kolejności za pomocą liniału i suwmiarki mierzono maksymalne wgniecenie plasteliny względem zerowej powierzchni w każdym punkcie zrzutu kuli. Na rys. 89 przedstawiono zależność maksymalnej deformacji podłoża plastelinowego w zależności od temperatury wygrzewania. Wyniki badań eksperymentalnych aproksymowano funkcją wykładniczą (29).

$$D_p(T) = D_{p0} + D_{p1} \cdot \exp\left(\frac{T-T_0}{T_1}\right) \quad (29)$$

Wartości parametrów poszczególnych parametrów funkcji aproksymującej wynosiły $D_{p0}=8.97$, $D_{p1}=2.18$, $T_0= 29.25$ i $T_1=4.42$. Obliczona podczas aproksymacji wartość

współczynnika determinacji R^2 wynosiła 0.997, co wskazuje na bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymującej do danych pomiarowych.



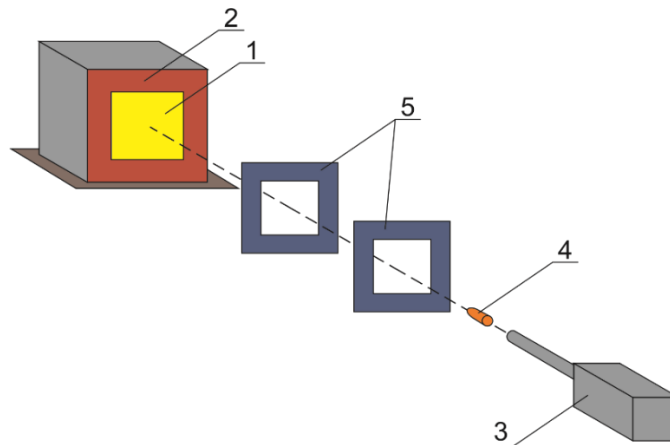
Rys. 89. Maksymalna deformacja podłoża plastelinowego w funkcji temperatury wygrzewania

Zgodnie z normą dla podłoża o prawidłowej kalibracji, średnia wartość maksymalnej deformacji dla pięciu punktów zrzutu powinna wynosić 19 ± 2 mm. Na podstawie równania funkcji aproksymującej, wyznaczono temperaturę wygrzewania podłoża plastelinowego ze wzoru (30):

$$T = T_1 \cdot \ln\left(\frac{D_p - D_{p0}}{D_{p1}}\right) + T_0 \quad (30)$$

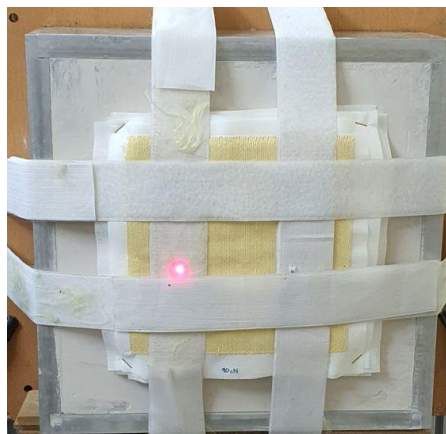
Po podstawieniu danych do równania (30) obliczono temperaturę wygrzewania podłoża plastelinowego równą 36.0°C w celu uzyskania maksymalnej głębokości deformacji po zrzucie kuli na poziomie 19 mm. W dalszej kolejności podłoże plastelinowe wygrzewano w piecu o temperaturze 36.0°C i dokonano zrzutu kuli na wygrzane podłoże zgodnie ze schematem przedstawionym na rys. 88. Średnia wartość maksymalnej deformacji podłoża w pięciu punktach zrzutu wynosiła 19.3 ± 0.5 mm, co uznano za zgodne z zaleceniami sformułowanymi w normie. Na tej podstawie przyjęto, że przed każdym ostrzałem podłoże plastelinowe będzie wygrzewane w temperaturze 36.0°C przez 24 godziny.

Do ostrzału w Laboratorium Badań Balistycznych przygotowano po trzy pakiety z każdego Wariantu od I do V. Ostrzał pakietów przeprowadzono na stanowisku przedstawionym schematycznie na rys. 90.



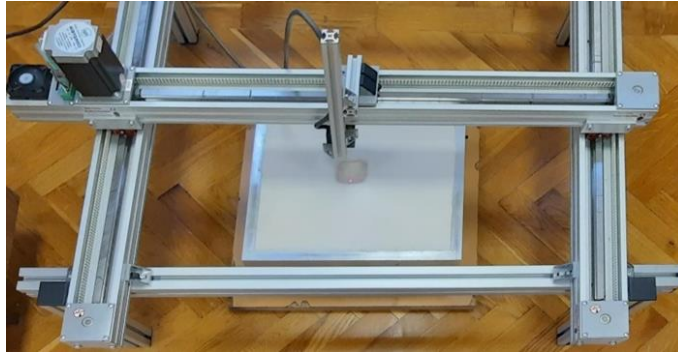
Rys. 90. Schemat stanowiska do badań balistycznych (1 – pakiet balistyczny; 2 – forma z plasteliną balistyczną; 3 - dział balistyczne; 4 - trajektoria pocisku; 5- zestaw bramek do pomiaru prędkości uderzenia pocisku)

Pakiet (1) przed ostrzałem mocowano na wykalibrowanym podłożu plastelinowym Roma No. 1 (2) za pomocą czterech taśm rzepowych. Ostrzał zamocowanego pakietu przeprowadzono za pomocą pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ (4) z prędkością 380 ± 3 m/s, oddając jeden strzał w środek pakietu balistycznego za pomocą dział balistycznego (3). Prędkość pocisku mierzono podczas każdego ostrzału za pomocą bramek do pomiaru prędkości pocisku (5). Na rys. 91 pokazano widok zamocowanego przykładowego pakietu balistycznego na znormalizowanym podłożu plastelinowym przed ostrzałem.



Rys. 91. Zamocowany pakiet na znormalizowanym podłożu plastelinowym

W celu pomiaru deformacji podłoża plastelinowego po ostrzale, skanowano je na stanowisku wyposażonym w laserowy czujnik odległości Omron ZX1 (Omron, Japonia), którego położenie w osiach XY sterowano napędami liniowymi z silnikami krokowymi (Rys. 92).



Rys. 92. Stanowisko do skanowania deformacji podłoża plastelinowego za pomocą laserowego czujnika odległości

Proces skanowania podłoża plastelinowego polegał na przemieszczaniu laserowego czujnika wzdłuż kolejnych linii skanowania za pomocą napędów liniowych i pomiarze głębokości deformacji. Pomiar głębokości deformacji dokonywano co 0.5 mm. Do sterowania pracą napędów liniowych i pomiaru głębokości deformacji zastosowano kartę pomiarową NI USB6255 (National Instruments, USA) oraz oprogramowanie, które opracowano w ramach pracy w języku programowania Visual Basic. Za każdym razem skanowano obszar o wymiarach 18 cm x 18 cm, przy czym środkowy punkt ustawiano zawsze w miejscu największego wgłębienia podłoża plastelinowego. Wyniki pomiarów wizualizowano za pomocą oprogramowania Origin.

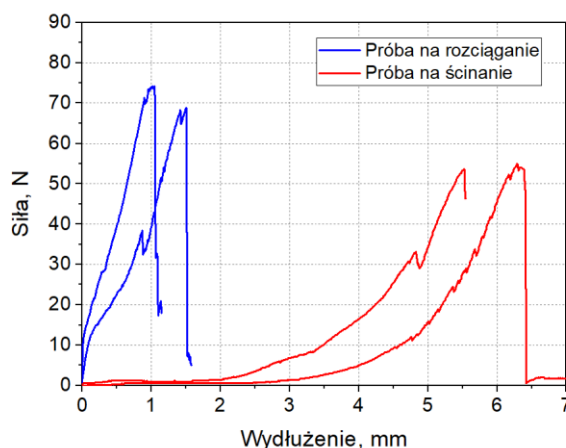
Pakiety balistyczne po ostrzale poddawano również analizie pod kątem liczby przestrzelonych warstw. Na tej podstawie obliczano współczynnik perforacji pakietu balistycznego ze wzoru (27). Obliczano również ekspansję pocisku ze wzoru (28). Średnicę pocisku po uderzeniu, potrzebną do obliczeń, mierzono za pomocą suwmiarki w sześciu różnych miejscach i na podstawie otrzymanych pomiarów wyznaczano wartość średnią.

5. WYNIKI BADAŃ NUMERYCZNYCH I EKSPERYMENTALNYCH

5.1. Badania efektywności balistycznej pakietów mocowanych w stalowych ramach

5.1.1. Wyznaczenie wartości parametrów *NFLS* i *SFLS*

W pierwszym etapie badań wyznaczono wartości parametrów *NFLS* i *SFLS* wymaganych do realizacji badań symulacyjnych uderzenia pocisku w pakiety balistyczne zawierające struktury haftowane. Badania przeprowadzono zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 2.3. Na rys. 93 przedstawiono przykładowe charakterystyki siły w funkcji wydłużenia uzyskane podczas prób wytrzymałościowych na rozciąganie i ścinanie układu mocującego nitkę para-aramidową jak na rys. 84. Podczas rozciągania, kierunek przemieszczania ruchomej szczęki maszyny wytrzymałościowej pokrywa się z kierunkiem ułożenia nitki mocującej, w której w związku z tym szybko przyrasta siła rozciągająca, powodująca w konsekwencji rozerwanie mocowania nitki para-aramidowej po ok. 1-1.5 mm. W przypadku próby wytrzymałościowej na ścinanie, w chwili początkowej kąt pomiędzy kierunkiem przemieszczania się ruchomej szczęki maszyny wytrzymałościowej a kierunkiem ułożenia nitki mocującej wynosi 90° . Podczas rozpoczęcia próby, kąt ten stopniowo zmniejsza się powodując wydłużenie nitki mocującej i przyrost siły ścinającej. Rozerwanie mocowania przy tym obciążeniu następuje po przemieszczeniu szczęki o ok. 5.5-6.5 mm.

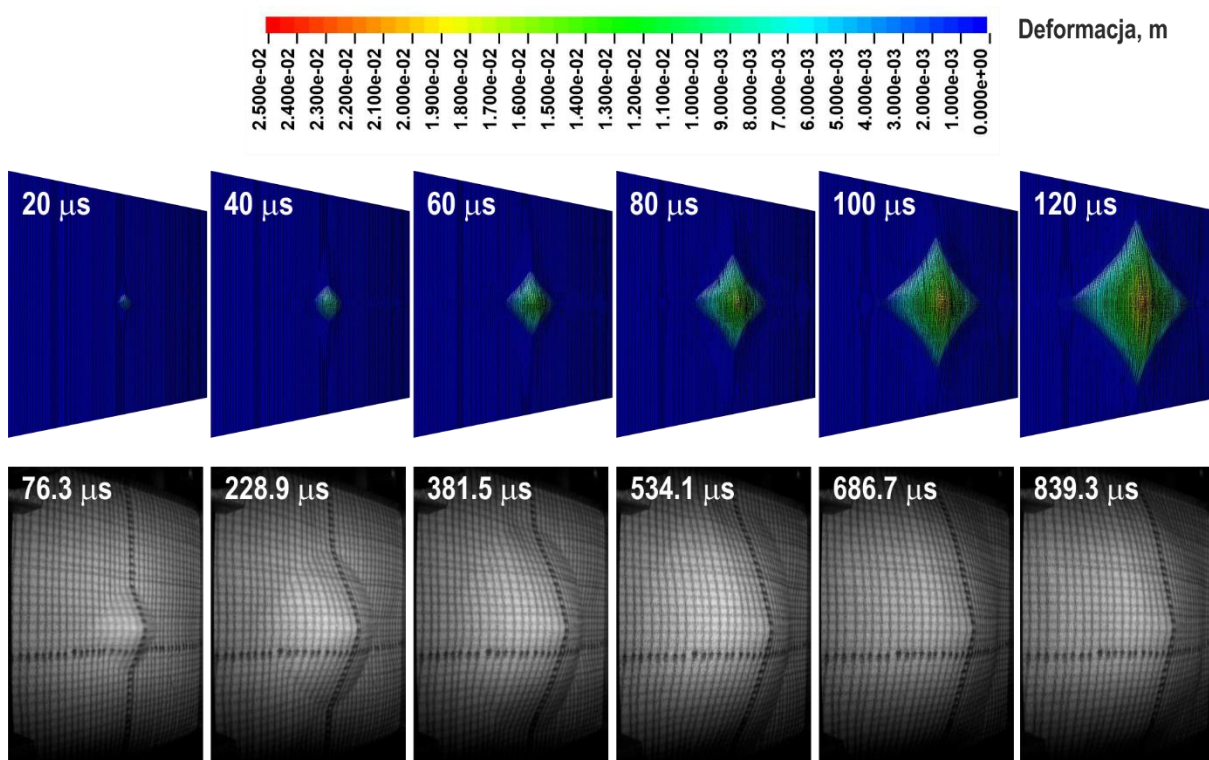


Rys. 93. Przykładowe wyniki badań wytrzymałościowych na rozciąganie i ściskanie układu przedstawionego na rys. 84

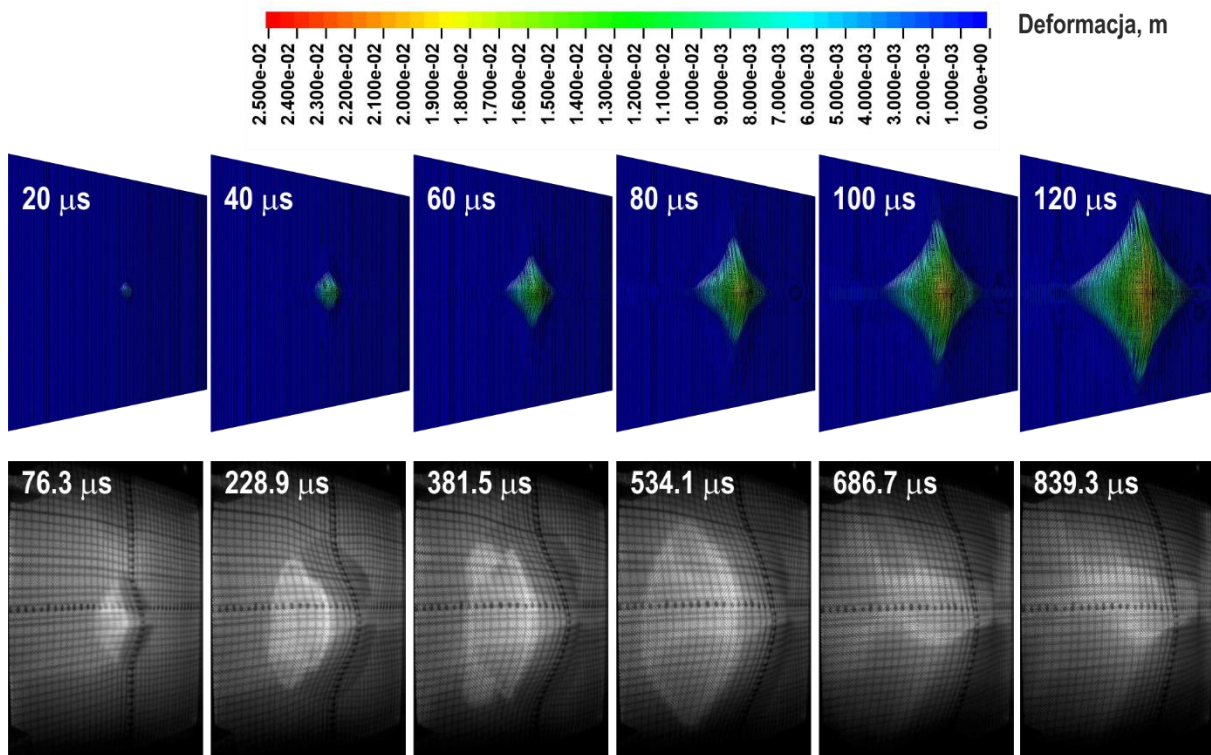
Na podstawie sześciu przeprowadzonych prób na rozciąganie i ścinanie, wyznaczono średnie wartości sił zrywających układ mocowania nitki para-aramidowej, które wynosiły odpowiednio dla rozciągania 66 ± 13.8 N a dla ścinania 62 ± 11.9 N. Biorąc pod uwagę średnie wartości tych sił, wartości parametrów *NFLS* i *SFLS* wyliczono na podstawie wzorów (25) i (26) i wynosiły one odpowiednio 1.74 i 1.64 MPa, dla $w_e=0.86$ mm i $h_n=44$ mm. Tak wyznaczone wartości parametrów *NFLS* i *SFLS* zastosowano następnie w badaniach numerycznych.

5.1.2. Badania numeryczne i eksperymentalne pakietów balistycznych w zależności od wariantu ułożenia warstw

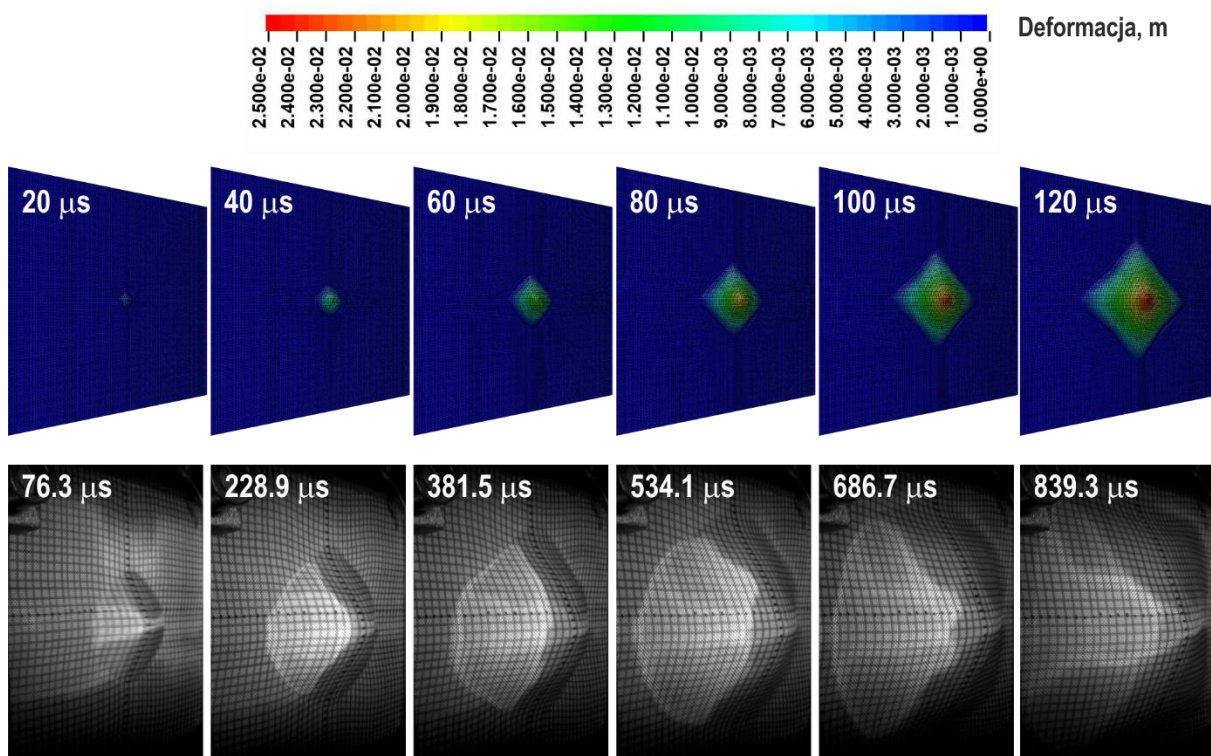
W ramach tych badań pakiety wykonane w Wariantach od I do V mocowano w stalowych ramach i dokonywano ostrzału pociskiem Parabellum 9x19 FMJ zgodnie z przyjętą metodyką badań numerycznych i eksperymentalnych. Na rys. 94-98 przedstawiono rozkład deformacji tylnej strony pakietu balistycznego, w zależności od czasu uzyskany za pomocą badań numerycznych i eksperymentalnych dla wariantów ułożenia warstw od I do V. Wyniki badań numerycznych przedstawiono w sekwencji czasowej od 20 do 120 μs a wyniki badań eksperymentalnych w sekwencji czasowej od 76.3 do 839.3 μs . Obie sekwencje dobrano tak, aby przedstawić rozwój stożków odkształcenia w poszczególnych wariantach pakietów od jego początków formowania się, aż do uzyskania wartości maksymalnej w chwili zatrzymania pocisku. Skala barwna na tych rysunkach odnosi się do wyników badań numerycznych i zawiera przypisane do poszczególnych barw wartości numeryczne deformacji podane w metrach.



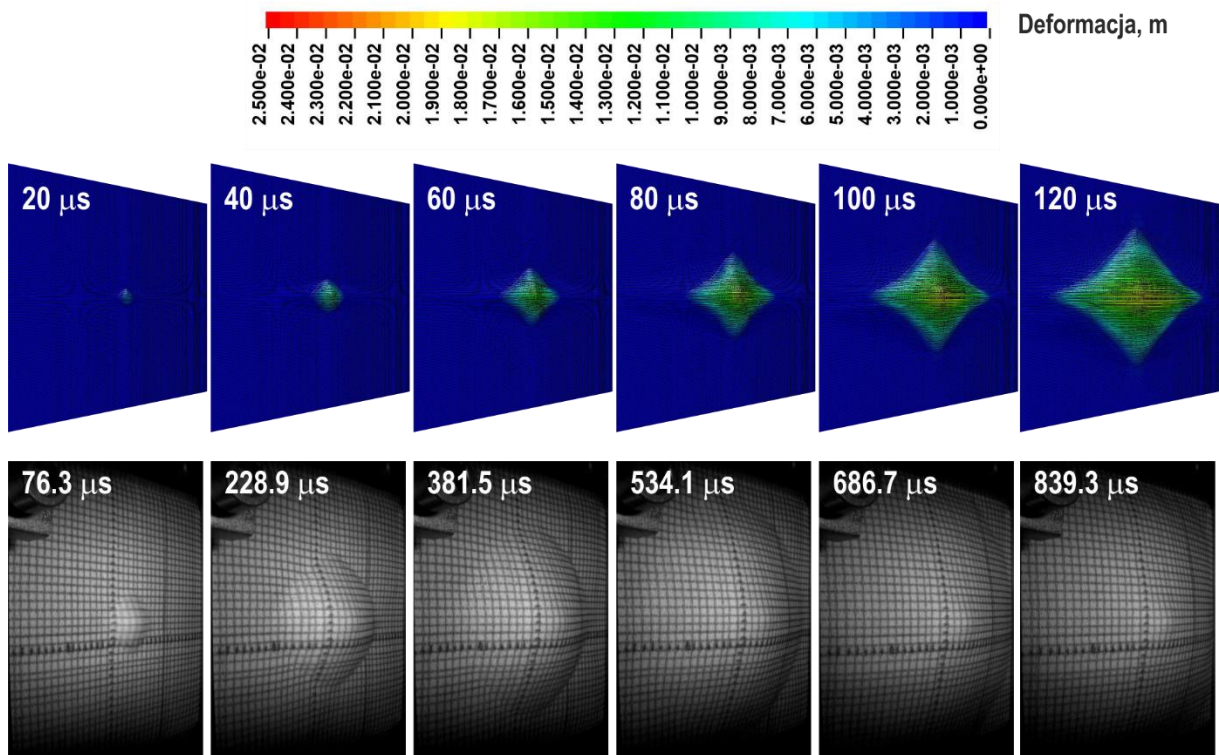
Rys. 94. Deformacja pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu I podczas uderzenia pocisku



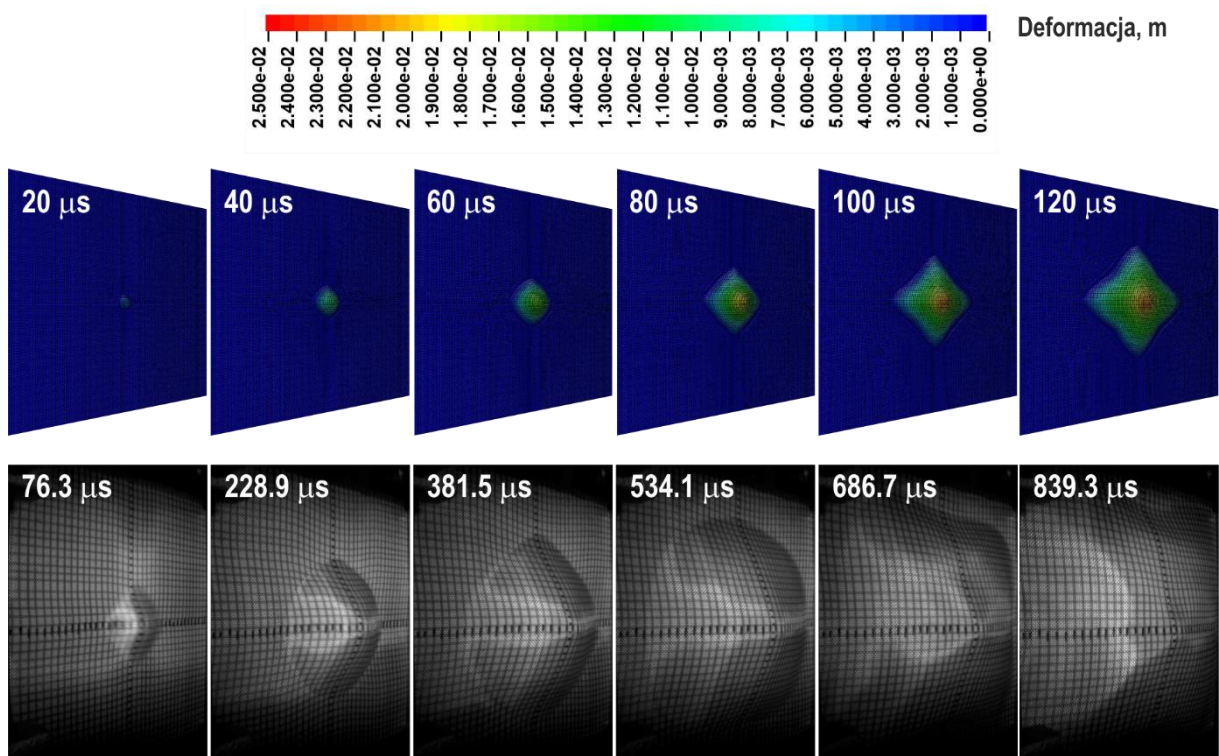
Rys. 95. Deformacja pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu II podczas uderzenia pocisku



Rys. 96. Deformacja pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu III podczas uderzenia pocisku



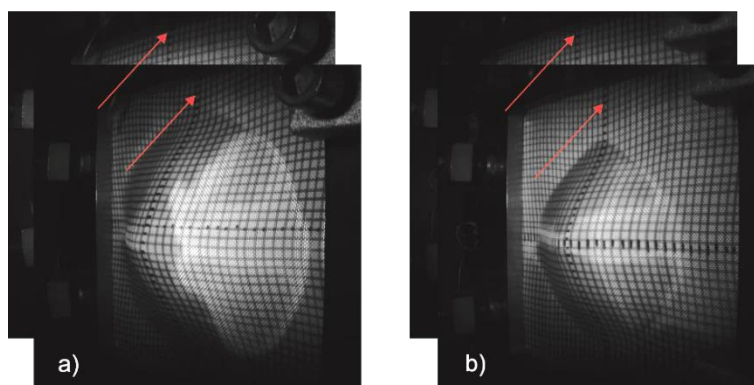
Rys. 97. Deformacja pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu IV podczas uderzenia pocisku



Rys. 98. Deformacja pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu V podczas uderzenia pocisku

Analiza deformacji dla poszczególnych wariantów pakietów przedstawionych na rys. 94-98 wskazuje na znaczące różnice w ich wartościach uzyskanych w badaniach numerycznych

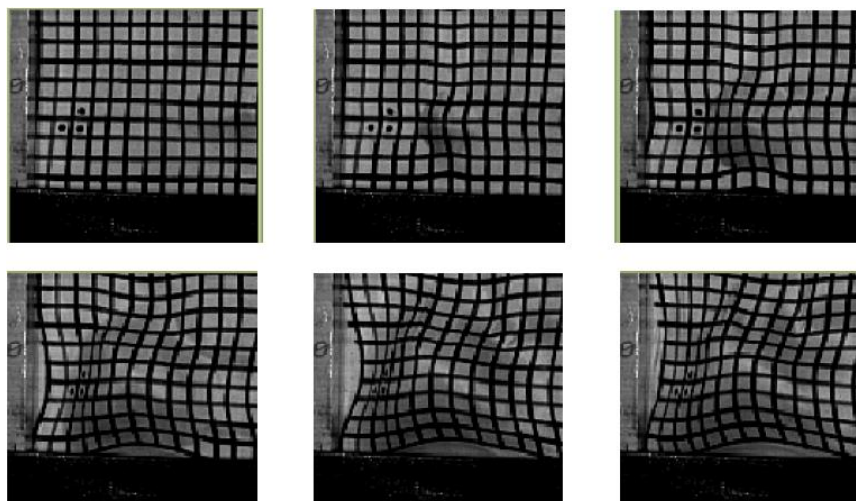
i eksperymentalnych. Te różnice występują przynajmniej z dwóch powodów. Po pierwsze podczas analizy obrazów uzyskanych za pomocą kamery do szybkiej rejestracji, dostrzeżono wysuwanie się warstw pakietu balistycznego ze stalowych ram podczas uderzenia pocisku, głównie na linii nitki kontaktujących się z czołem pocisku (Rys. 99) pomimo zastosowanego bardzo solidnego systemu mocowania. Wynika on z generowania bardzo wysokich naprężeń w nitkach kontaktujących się z czołem pocisku. Starano się ograniczyć to zjawisko do minimum, jednak nie znaleziono praktycznych rozwiązań, aby całkowicie wyeliminować wysuwanie się warstw z ram stalowych.



Rys. 99. Wysunięcie pakietu balistycznego z ram mocujących w chwili zatrzymania pocisku:
a) Wariant III, b) Wariant V

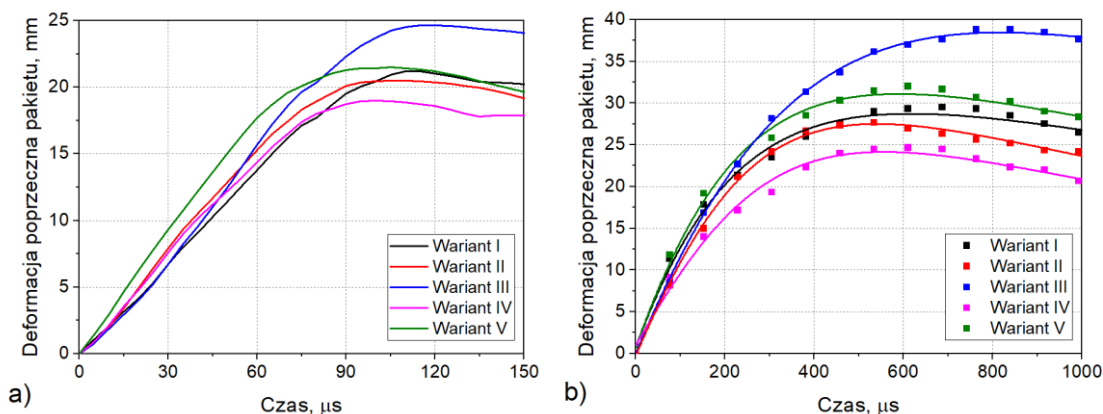
Na rys. 99 widoczne jest wysunięcie z ram stalowych pakietów wykonanych w Wariancie III i V w chwili zatrzymania pocisku, które wynosi przynajmniej dwie podziałki siatki naniesionej na ostatnią warstwę pakietu. Strzałki znajdujące się wyżej na rys. 99 pokazują brzegowe linie siatki przed uderzeniem pocisku a strzałki znajdujące się niżej, pozycję brzegowych linii siatki w chwili zatrzymania pocisku. Ponieważ podziałka tej siatki wynosiła 5 mm to wartość tego wysunięcia wynosi ok. 10 mm. Biorąc pod uwagę obie strony mocowania, nitki kontaktujące się z czołem pocisku mogą zwiększać swoją długość podczas penetracji pocisku o ok. 20 mm, co jest bardzo dużą wartością mającą znaczący wpływ na wartości deformacji pakietu. Zjawisko wysuwania się warstw pakietu balistycznego jest znanym problemem zgłaszanym w publikacjach dotyczących badań efektywności pakietów balistycznych zakleszczonych w ramach stalowych [49, 106-108]. Badania wskazują, że wysuwanie się warstw pakietu podczas ostrzału zwiększa absorpcję energii kinetycznej pocisku przez warstwy pakietu, jednak z drugiej strony, generowana jest większa deformacja poprzeczna pakietu [106]. Inne badania wskazują, że wysuwanie się warstw zakleszczonych w ramach podczas uderzenia pocisku nawet w niewielkim zakresie, może radykalnie wpłynąć na ocenę skuteczności balistycznej pakietów, bowiem wprowadza dodatkowe źródło zmienności co utrudnia porównanie wyników badań eksperymentalnych z wynikami badań numerycznych, w których krawędzie warstw modeluje się jako idealnie zaciśnięte [107]. Na rys. 100 pokazano badania ostrzału pakietu balistycznego, składającego się z 28

warstw tkanin para-aramidowych Kevlar KM2, pociskiem Remington 124x9 mm FMJ. Pakiet przed ostrzałem był zakleszczony pomiędzy ząbkowanymi stalowymi ramami [108]. Widoczne jest wysuwanie się warstw pakietu balistycznego z ram na skutek dużych naprężeń powstałych w nitkach głównych podczas ostrzału pociskiem.



Rys. 100. Sekwencja obrazów z kamery do szybkiej rejestracji podczas ostrzału pakietu z tkanin para-aramidowych Kevlar KM2 [108]

Drugą przyczyną różnic w wartościach deformacji uzyskanych w badaniach numerycznych i eksperymentalnych może być delikatne zafalowanie nitek obserwowane w strukturach haftowanych (Rys. 75). Podczas procesu haftowania nitka para-aramidowa jest naprężana i mocowana jako rozprostowana, jednak podczas zdejmowania struktury haftowanej z maszyny następuje delikatna relaksacja tej struktury, która powoduje zafalowanie nitek. Podczas uderzenia pocisku, zafalowane nitki najpierw ulegają rozprostowaniu a następnie zaczynają przenosić duże naprężenia wynikające z ich rozciągania. Procesowi rozprostowania towarzyszy przyrost deformacji poprzecznej pakietu balistycznego. Te dwa efekty wynikające z wysuwania się pakietu z ram stalowych oraz zafalowanie nitek w strukturze haftowanej nie występują w modelu numerycznym pakietu, bowiem węzły na końcach nitek są całkowicie zablokowane i nie mogą się przesuwać w żadnym kierunku a model nitki w strukturze haftowanej przyjęto jako idealnie rozprostowany, stąd mniejsze wartości deformacji notowane w badaniach numerycznych. Na rys. 101 przedstawiono maksymalną deformację poprzeczną pakietu balistycznego, w zależności od wariantu ułożenia warstw, uzyskane za pomocą badań numerycznych (Rys. 101a) i eksperymentalnych (Rys. 101b). W przypadku badań eksperymentalnych na wykresie punktowo przedstawiono wyniki deformacji pakietu odczytane za pomocą metody przedstawionej na rys. 87.



Rys. 101. Maksymalna deformacja poprzeczna pakietu balistycznego w zależności od wariantu ułożenia warstw: a) badania numeryczne, b) badania eksperymentalne

Wyniki badań eksperymentalnych dla poszczególnych wariantów pakietów, aproksymowano funkcją Neldera (31):

$$D_E(t) = \frac{t+a}{b_0+b_1(t+a)+b_2(t+a)^2} \quad (31)$$

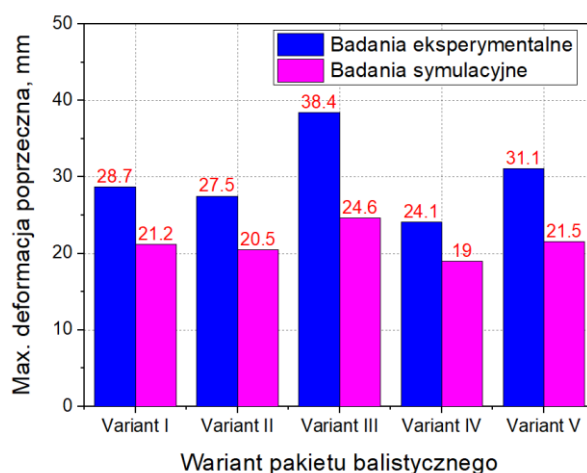
gdzie D_E jest deformacją pakietu balistycznego natomiast a , b_0 , b_1 , b_2 są parametrami funkcji aproksymującej Neldera. W tabeli 10 przedstawiono wartości tych parametrów dla poszczególnych wariantów pakietów oraz współczynnika determinacji R^2 , który jest miarą dopasowania funkcji aproksymującej do danych pomiarowych. Obliczone podczas aproksymacji wartości współczynników determinacji R^2 powyżej 0.98 wskazują na bardzo dobre dopasowanie funkcji aproksymujących do danych pomiarowych.

Tabela 10. Wartości parametrów funkcji aproksymującej wyniki badań eksperymentalnych deformacji poprzecznej pakietów balistycznych

Wariant pakietu balistycznego	a	b_0	b_1	b_2	R^2
Wariant I	4.18	6.65	0.0134	1.72E-05	0.99
Wariant II	4.25	6.54	0.0102	1.85E-05	0.99
Wariant III	-0.39	7.82	0.0069	1.17E-05	0.99
Wariant IV	10.26	10.72	0.0036	3.33E-05	0.98
Wariant V	-2.31	8.088	0.0063	2.79E-05	0.99

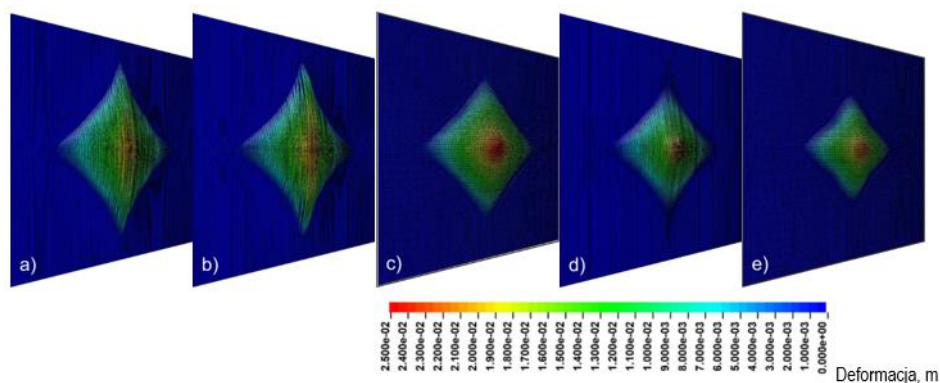
Wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych pokazują, że najmniejsza deformacja występuje w pakiecie wykonanym w Wariacie IV i wynosi ona odpowiednio 19.0 oraz 24.1 mm. Z kolei największa deformacja występuje w pakiecie wykonanym w Wariacie III, w którym warstwy tkanin i struktur haftowanych są ułożone w odwrotnej kolejności niż w Wariacie IV, i wynosi ona odpowiednio 24.6 oraz 38.4 mm. Powszechnie stosowany w praktyce pakiet balistyczny złożony z tkanin, oznaczony jako Wariant V, wykazuje znacząco większą wartość deformacji w stosunku do najlepszego Wariantu IV, które w badaniach

numerycznych i eksperymentalnych wynosiły odpowiednio 21.5 oraz 31.1 mm. Mniejsze wartości deformacji niż w pakiecie złożonym z tkanin (Wariant V) uzyskano także dla pakietu złożonego tylko ze struktur haftowanych (Wariant I), odpowiednio 21.2 i 28.7 mm oraz dla pakietu z warstwami tkanin i struktur haftowanych ułożonych na przemian (Wariant II), odpowiednio 20.5 i 27.5 mm. Na rys. 102 porównano maksymalne deformacje poprzeczne, uzyskane poprzez badania numeryczne i eksperymentalne, pakietów wykonanych w Wariantach od I do V po ostrzale pociskiem Parabellum 9x19 FMJ. Należy stwierdzić, że pomimo istotnych różnic maksymalnych deformacji pomiędzy badaniami numerycznymi i eksperymentalnymi, uzyskano całkowitą zgodność pomiędzy tymi badaniami w kolejności wariantów pakietów od najmniejszej do największej maksymalnej deformacji poprzecznej.



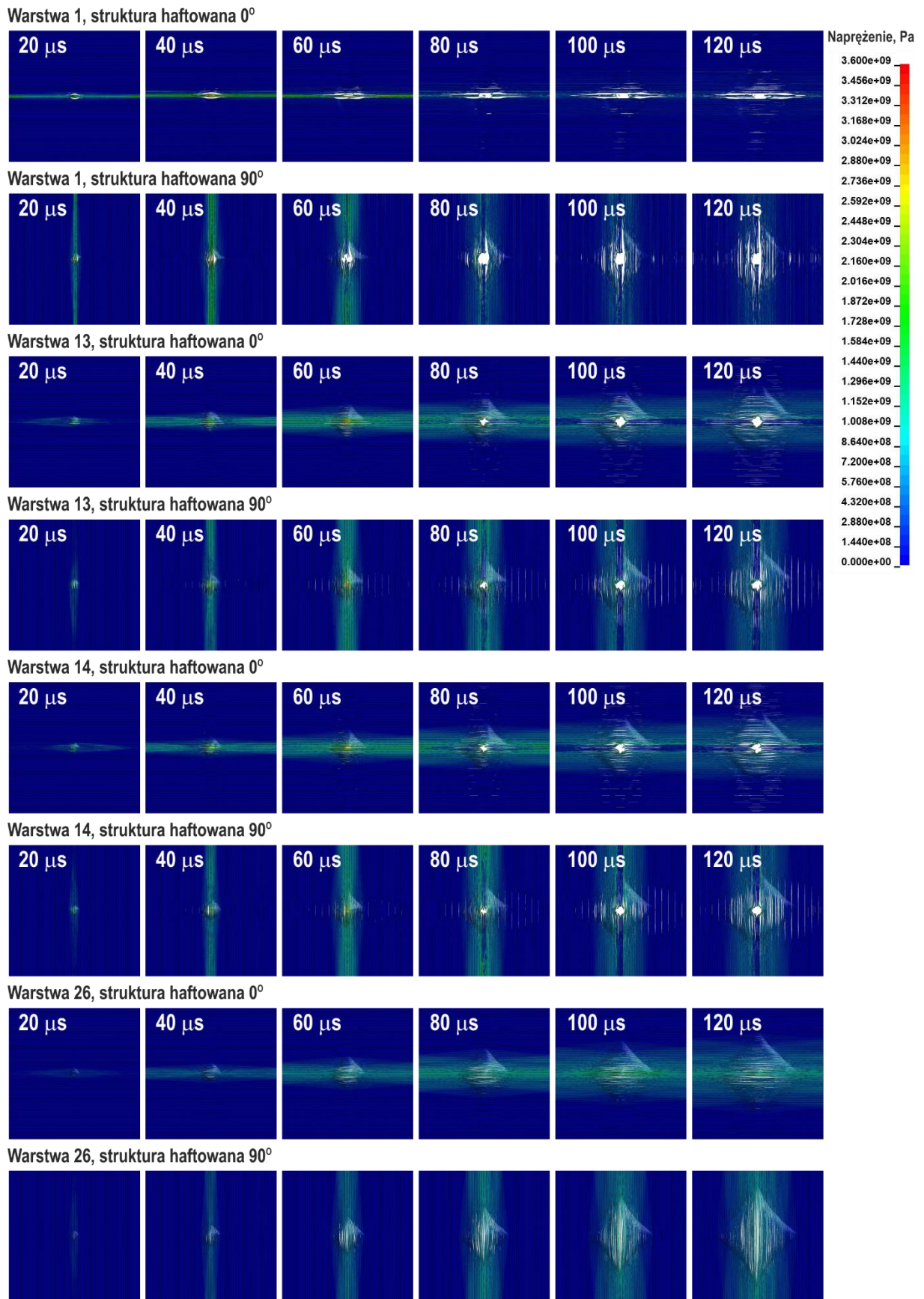
Rys. 102. Maksymalna deformacja poprzeczna pakietów w zależności od wariantu wykonania

Na rys. 103 przedstawiono widoki stożków odkształcenia w chwili zatrzymania pocisku dla analizowanych wariantów pakietów balistycznych, uzyskane za pomocą badań numerycznych. Różnice w deformacjach poprzecznych pakietów wykonanych w Wariantach od I do V, należy przypisać występowaniu w tych pakietach struktur haftowanych oraz hybrydowemu ułożeniu struktur haftowanych względem tkanin, bowiem zarówno w tkaninach jak i strukturach haftowanych występują te same nitki para-aramidowe a masa powierzchniowa tych struktur jest porównywalna, nie wliczając w strukturze haftowanej masy podłoża w postaci włókniny PP oraz masy nici mocujących przędzę para-aramidową. Porównując pakiet balistyczny wykonany w całości ze struktur haftowanych (Wariant I) z pakietem wykonanym w całości z tkanin (Wariant V), maksymalna wartość deformacji jest mniejsza w pakiecie ze struktur haftowanych, które wykonano jako dwa układy nitek w konfiguracji 0/90°. W tej strukturze nie występuje efekt przeplatania nitek więc z jednej strony, podczas uderzenia pocisku nitki od razu przenoszą duże naprężenia w odróżnieniu od tkaniny (Wariant V), gdzie po uderzeniu pocisku nitki najpierw rozprostowują się i dopiero po tym są zdolne do przenoszenia dużych naprężeń.



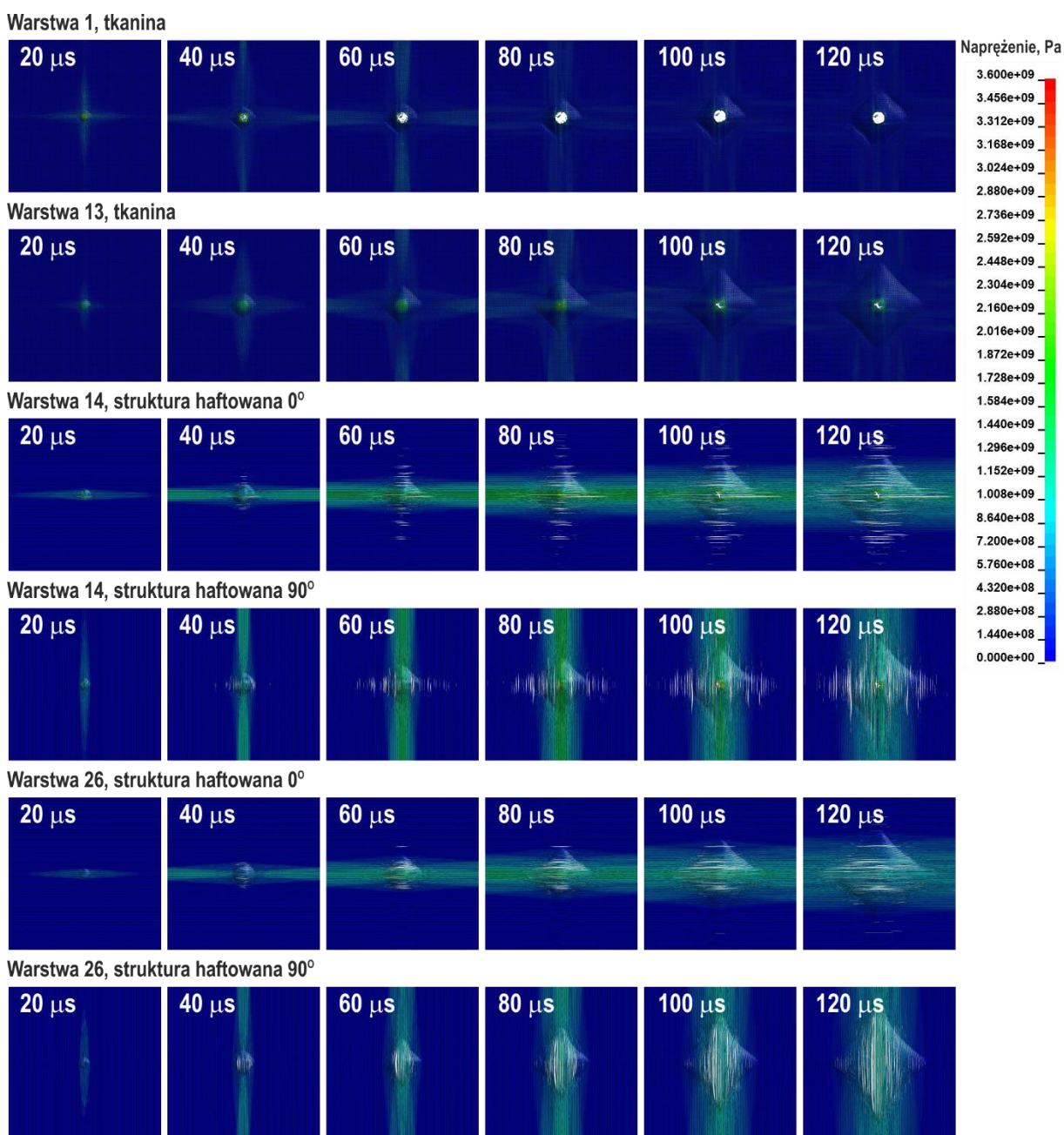
Rys. 103. Widok stożków odkształcenia w chwili zatrzymania pocisku w badaniach numerycznych: a) Wariant I, b) Wariant II, c) Wariant III, d) Wariant IV, e) Wariant V

Procesowi rozprostowywania się nitek w tkaninie towarzyszy zwiększona deformacja poprzeczna. Z drugiej strony, znane są badania prędkości propagacji fali naprężeń w tkaninach, które wskazują, że są one mniejsze od prędkości propagacji fali naprężeń w pojedynczych nitkach z których są wykonane [109-110]. Wpływ na to ma przede wszystkim przeplatana struktura tkaniny. Ponieważ w strukturze haftowanej nie występują przepłyty, to można założyć w przybliżeniu, że prędkość rozchodzenia się fali naprężeń w tej strukturze będzie porównywalna jak dla pojedynczej nitki para-aramidowej i większa jak w tkaninie. Większa propagacja fali naprężeń w strukturze haftowanej korzystnie wpływa na zwiększenie obszaru rozłożenia fali naprężeń w płaszczyźnie warstw wokół punktu uderzenia pocisku. Na rys. 104-108 pokazano rozkład naprężeń w 1, 13, 14 i 26 warstwie, podczas uderzenia pocisku w pakiet balistyczny o określonym wariacie ułożenia warstw. Rozkład w warstwie 1 pozwala na obserwację rozchodzenia się naprężeń po zetknięciu pocisku z pakietem balistycznym. Jest to warstwa najbardziej narażona na destrukcję, ponieważ energia pocisku jest wtedy największa. W przypadku warstw 13 i 14 pokazano rozkłady naprężeń, aby zobaczyć, jak przenoszone są naprężenia na granicy faz, zwłaszcza w pakietach wykonanych w Wariantach III i IV. Z kolei rozkład naprężeń w warstwie 26 pozwala na obserwację jaki maksymalny obszar pakietu przenosi naprężenia. W przypadku wystąpienia struktury haftowanej w analizowanej warstwie, na rysunkach pokazano oddzielnie rozkład naprężeń dla pasma ułożonego pod kątem 0° i pod nim bezpośrednio dla pasma ułożonego pod kątem 90° .



Rys. 104. Naprężenia w warstwach 1, 13, 14, 26 pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu I podczas uderzenia pocisku (badania symulacyjne)

W przypadku pakietu wykonanego w Wariancie I (Rys. 104), w warstwie 1 haftowanej już po 20 μs , w obu pasmach, obserwuje się znaczące wartości naprężeń na całej długości nitki kontaktujących się z czołem pocisku. Część tych nitki następnie rozsuwa się w wyniku kontaktu z czołem pocisku a pojedyncze nitki ulegają pęknięciu. W połowie pakietu, w warstwach 13 i 14 po 20 μs niezerowe naprężenia nie obejmują całej długości nitki, co wynika z opóźnienia rozwoju stożka odkształcenia przy malejącej prędkości pocisku w wyniku absorpcji energii przez poprzedzające warstwy. Pasma nitki w tych warstwach objętych niezerową deformacją są znacznie szersze niż w warstwie 1, co wynika z rozwoju stożka odkształcenia.



Rys. 105. Naprężenia w warstwach 1, 13, 14, 26 pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu II podczas uderzenia pocisku (badania symulacyjne)

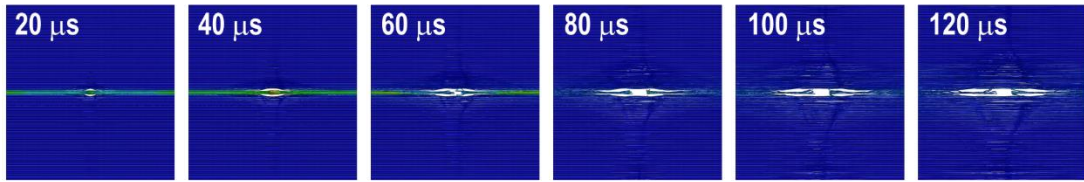
Zasadniczo można stwierdzić, że niezerowe naprężenia występują do granic niezerowej deformacji poprzecznej w danym paśmie nitki. W warstwach 13 i 14 widoczna jest całkowita penetracja tych warstw, co jest efektem łatwego rozsuwania się nitki w strukturach haftowanych w kontakcie z czołem pocisku. W warstwie ostatniej 26, szerokość pasm z niezerowym naprężeniem po 100-120 μ s jest największa. Jest to oczywiste z uwagi na największy obszar niezerowej deformacji poprzecznej. Nitki w poszczególnych pasmach na linii uderzenia pocisku, ulegają tylko nieznacznie rozsunięciu z uwagi na to, że kąt natarcia stożka odkształcenia uformowany w warstwie poprzedzającej jest znacznie większy w porównaniu z kątem natarcia występującego w pocisku. W chwili zatrzymania pocisku, po ok. 120 μ s, obszar niezerowych naprężeń obejmuje 40-45% obu pasm nitki w 26 warstwie pakietu balistycznego.

W przypadku pakietu wykonanego w Wariancie II (Rys. 105), w pierwszej warstwie występuje tkanina. Naprężenia w nitkach kontaktujących się z czołem pocisku rozchodzą się znacznie wolniej niż w warstwie 1 pakietu wykonanego w Wariancie I, gdzie występuje struktura haftowana. Po 20 μ s tylko połowa długości nitki objęta jest niezerowym naprężeniem, gdzie w strukturze haftowanej po tym czasie niezerowe naprężenia występują na całej długości. Dowodzi to mniejszej prędkości propagacji naprężeń w strukturze tkaniny w stosunku do struktury haftowanej. Zjawisko to jest znane i było opisywane w literaturze [109-110]. Z tego względu następuje bardzo duża koncentracja w punkcie uderzenia pocisku, która prowadzi do szybkiego zerwania nitki kontaktujących się z czołem pocisku. Pełna penetracja warstwy następuje praktycznie po ok. 60 μ s. Z kolei w połowie pakietu, w warstwie tkaniny 13 i warstwie haftowanej 14, znacząco większy obszar niezerowych naprężeń występuje w strukturze haftowanej. W strukturze tkaniny, duże wartości naprężeń występują tylko w punkcie uderzenia pocisku. Z kolei w warstwie 26 pakietu balistycznego, gdzie występuje struktura tkanina, szerokość pasm nitki objętych niezerowym naprężeniem jest największa, co wynika z największego obszaru niezerowej deformacji poprzecznej w tej warstwie.

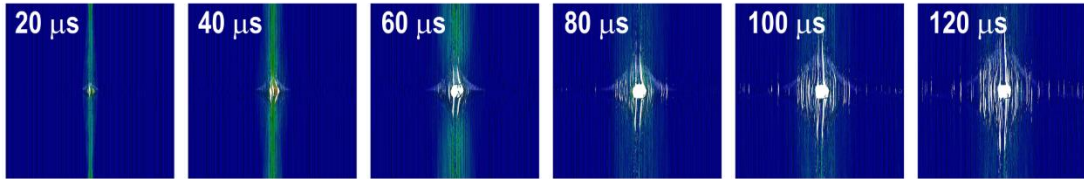
W przypadku pakietu wykonanego w Wariancie III (Rys. 106), gdzie pierwsze 13 warstw pakietu stanowią struktury haftowane a następnie z tyłu ułożonych jest 13 warstw tkanin, w warstwie 1 zjawiska zachodzą podobnie jak w pakiecie wykonanym w Wariancie I (Rys. 104). Można zaobserwować szybkie rozchodzenie się naprężeń i penetracje warstwy wynikającej z rozsuwania się nitki w kontakcie z czołem pocisku i zerwanie pojedynczych nitki w obu pasmach struktury haftowanej. W połowie pakietu pomiędzy fazą haftowaną a fazą tkaniną, większe naprężenia występują w strukturze haftowanej, chociaż obszar niezerowych naprężeń obserwowany w 120 μ s, jest bardzo podobny w obu strukturach. Penetracji ulega zarówno struktura haftowana jak i tkanina, co jest wynikiem łatwego rozsuwania się warstw haftowanych a w przypadku tkaniny, dużej koncentracji naprężeń w

punkcie uderzenia pocisku. W ostatniej 26 warstwie pakietu, obserwowane są niezerowe naprężenia w pasmach nitek wążku i osnowy, wynikające z rozmiarów stożka odkształcenia.

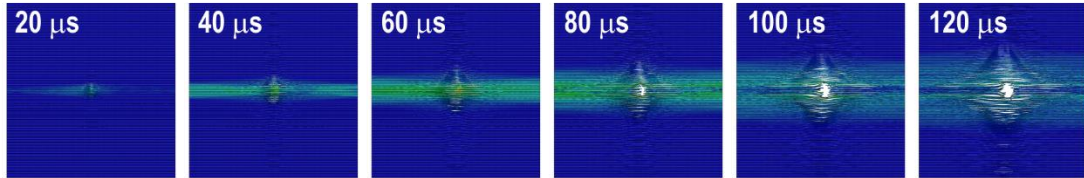
Warstwa 1, struktura haftowana 0°



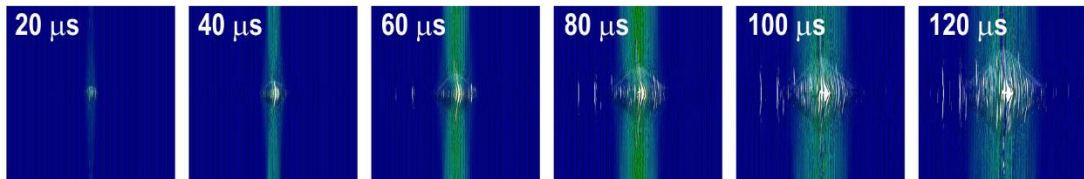
Warstwa 1, struktura haftowana 90°



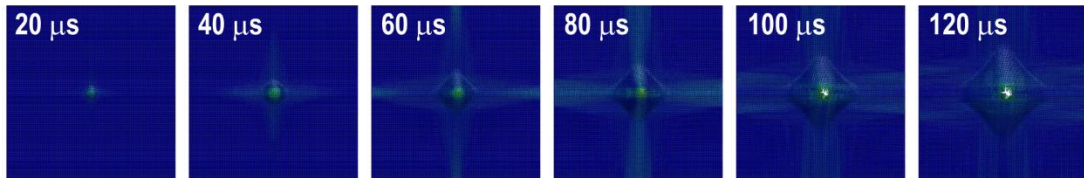
Warstwa 13, struktura haftowana 0°



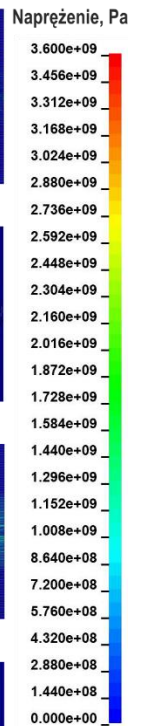
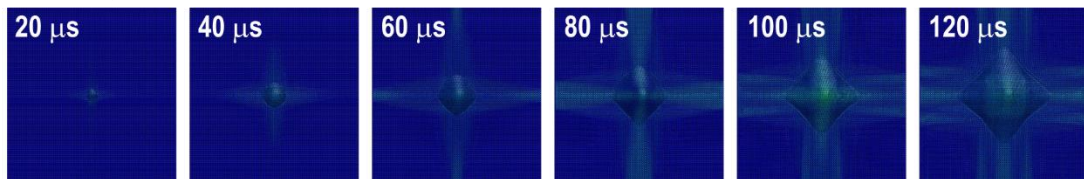
Warstwa 13, struktura haftowana 90°



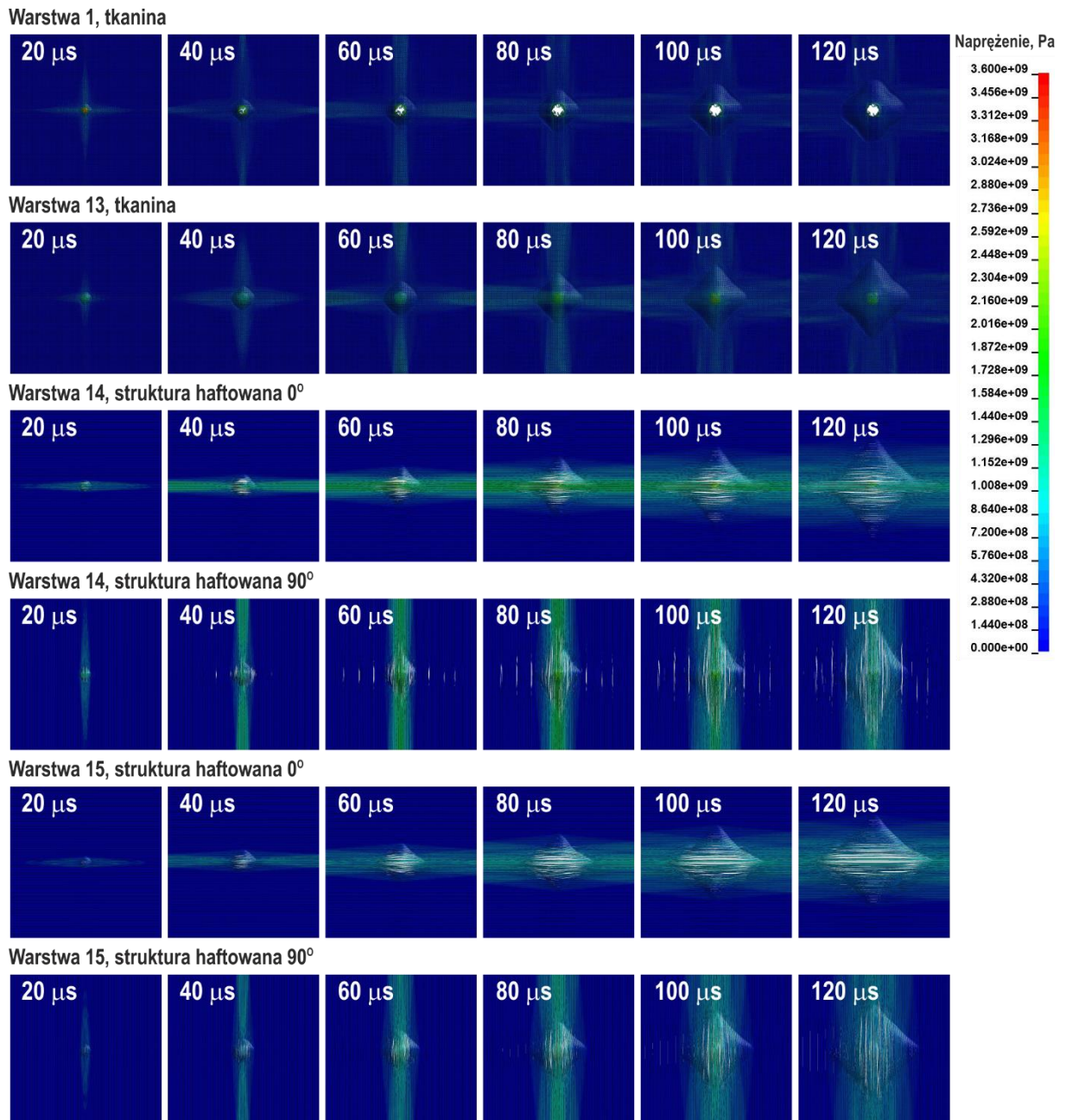
Warstwa 14, tkanina



Warstwa 26, tkanina



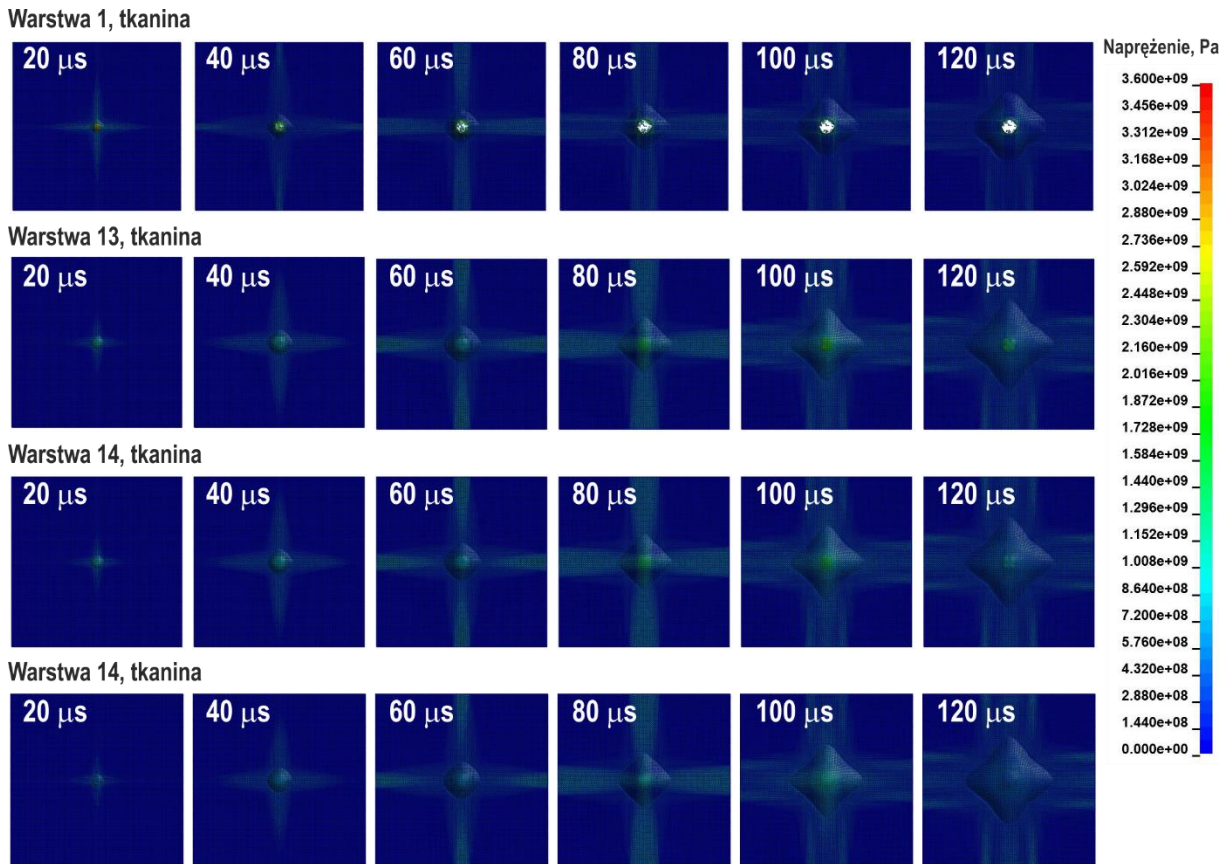
Rys. 106. Naprężenia w warstwach 1, 13, 14, 26 pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu III podczas uderzenia pocisku (badania symulacyjne)



Rys. 107. Naprężenia w warstwach 1, 13, 14, 26 pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu IV podczas uderzenia pocisku (badania symulacyjne)

W przypadku pakietu wykonanego w Wariancie IV (Rys. 107), gdzie pierwsze 13 warstw pakietu stanowią tkaniny a następnie z tyłu ułożonych jest 13 struktur haftowanych, w warstwie 1 zjawiska zachodzą podobnie jak w pakiecie wykonanym w Wariancie II (Rys. 105). W połowie pakietu pomiędzy fazą tkaną a fazą haftowaną, większe naprężenia występują w strukturze haftowanej, jednak obszar niezerowych naprężeń obserwowany w 120 μs , jest również bardzo znaczący w strukturze tkanej. Należy zauważyć, że tkanina w warstwie 13 nie ulega penetracji a pasma nitki w strukturze haftowanej w warstwie 14 w ogóle nie są rozsunięte. Z tego prawdopodobnie wynika niesamowita efektywność balistyczna pakietu wykonanego w takim układzie hybrydowym. Żadna nitka w strukturach

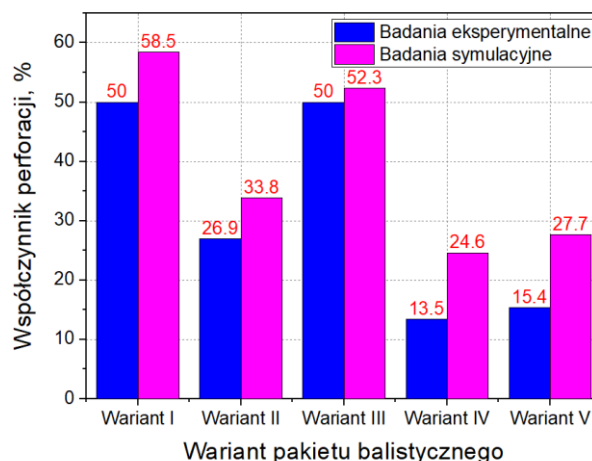
haftowanych nie ulega zerwaniu i całe kompletne struktury absorbują energię kinetyczną pocisku aż do jego zatrzymania. Podobnie w warstwie 26, pasma obu układów nie ulegają rozsunięciu a obszar nierowych naprężeń jest największy.



Rys. 108. Naprężenia w warstwach 1, 13, 14, 26 pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu V podczas uderzenia pocisku (badania symulacyjne)

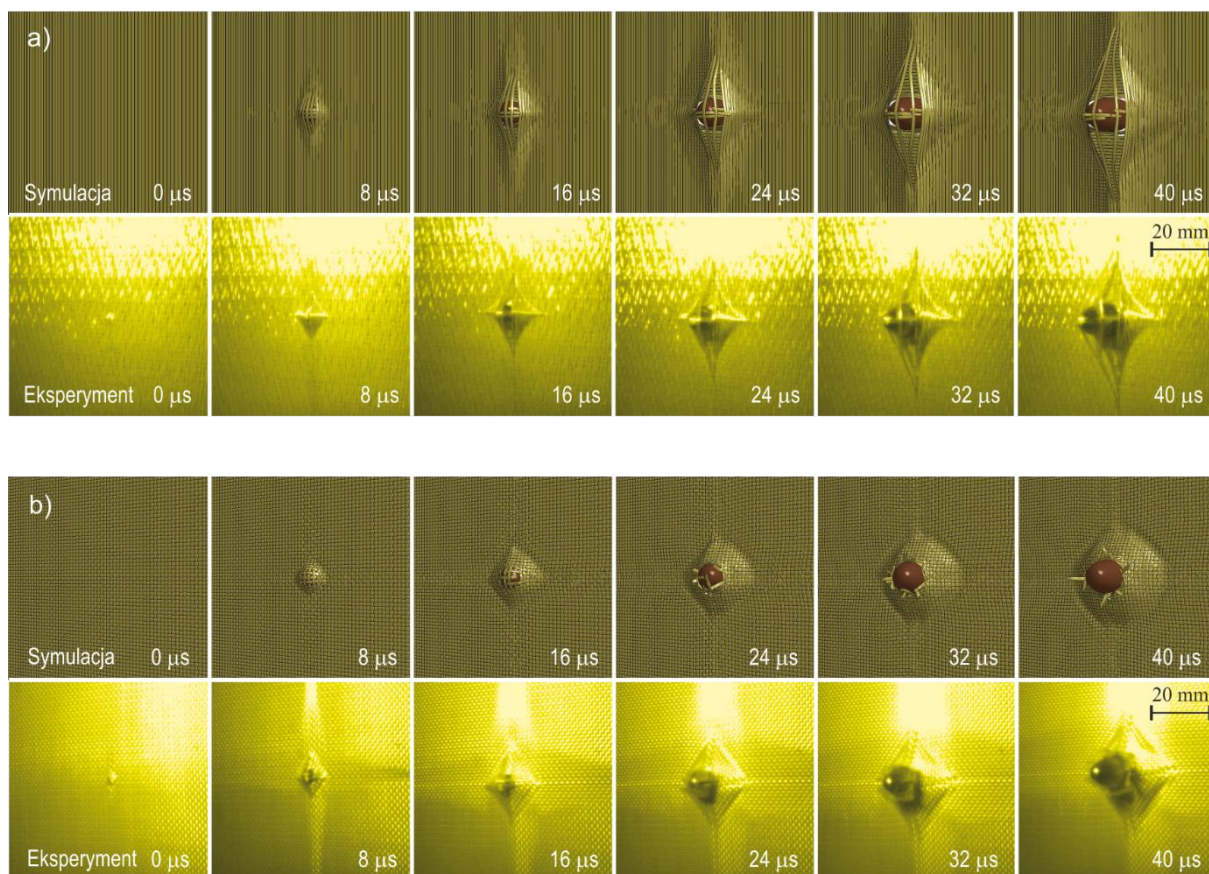
W przypadku pakietu wykonanego w Wariancie V (Rys. 108) cały pakiet wykonany jest z tkanin. W warstwie 1 obserwuje się rozchodzenie naprężeń wzdłuż nitki kontaktujących się z czołem pocisku znacznie wolniej niż w strukturach haftowanych, co wynika ze struktury przeplatanej tkaniny. W połowie pakietu w warstwach 13 i 14 obserwuje się bardzo podobny krzyżowy rozkład naprężeń, co wynika z jednofazowej struktury pakietu. Należy zauważyć, że zarówno warstwa 13 jak i 14 nie ulegają penetracji, co jest charakterystyczne dla tkanin, które cechują się generalnie małym współczynnikiem perforacji z uwagi na zakleszczoną strukturę nitki wątku i osnowy. Obserwuje się również charakterystyczną dla tkanin dużą kumulację naprężeń w punkcie uderzenia pocisku. W ostatniej 26 warstwie pakietu, rozkład naprężeń jest bardzo podobny do rozkładu naprężeń występującego w warstwie 14. Nieco mniejsze są jedynie wartości naprężeń w poszczególnych obszarach warstwy dla danej chwili czasowej. W 120 μs nie ma charakterystycznej kumulacji w punkcie uderzenia pocisku, bowiem pocisk zatrzymuje się w tej strukturze po ok. 115 μs następnie zaczyna się cofać, co powoduje zmniejszenie naprężeń.

Na rys. 109 przedstawiono wartości współczynnika perforacji dla badanych pakietów balistycznych wyznaczone na podstawie uzyskanych wyników badań symulacyjnych i eksperymentalnych. Dla porównywanych Wariantów I i V biorąc pod uwagę wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych, współczynnik ten wyniósł odpowiednio 58.5 i 50% oraz 27.7 i 15.4%.



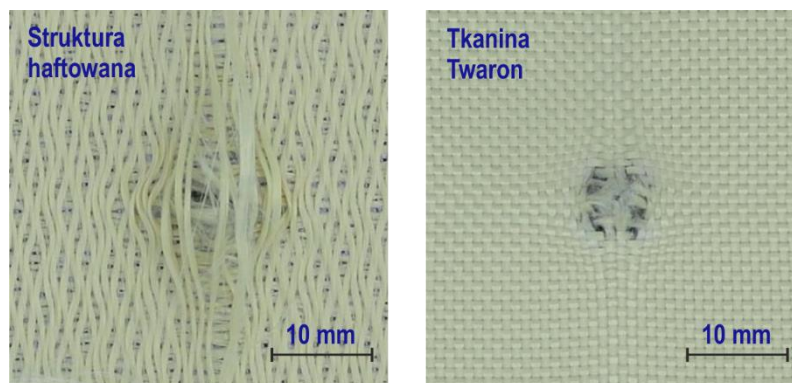
Rys. 109. Współczynnik perforacji badanych pakietów balistycznych w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych

Bardzo wysokie współczynniki perforacji uzyskane dla pakietów wykonanych ze struktur haftowanych wskazują, że w strukturach tych występuje łatwość rozsuwania się nitek podczas kontaktu z czołem pocisku. Czoło pocisku ma stosunkowo małą powierzchnię obejmującą zwykle 2-3 nitki osnowy i wątku a dodatkowo kulisto-stożkowy kształt czoła pocisku, co sprzyja rozsuwaniu się nitek. W tkaninie rozsuwanie się nitek w kontakcie z pociskiem jest zminimalizowane z uwagi na zakleszczanie się nitek w przepłotach. W strukturach haftowanych nitki są mocowane nicią mocującą, ale siła trzymania tych nitek w strukturze na skutek uderzenia pocisku jest znacząco mniejsza niż w tkaninach. Z tego względu analizowano otrzymane struktury haftowane pod kątem rozsuwania się nitek podczas uderzenia pocisku. W tym celu przeprowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne, z użyciem kamery do szybkiej rejestracji, uderzenia pocisku w pojedyncze warstwy tkane i haftowane. Na rys. 110 przedstawiono poszczególne etapy przebijania warstw przez pocisk w odstępach czasowych co 8 μ s.



Rys. 110. Badania symulacyjne i eksperymentalne przebicia jednej warstwy pociskiem: a) struktury haftowanej, b) tkaniny Twaron CT709

Jak widać na rys. 110, w przypadku przebicia struktury tkanej już po ok. 16 μs od kontaktu tkaniny z pociskiem, widoczne jest czoło pocisku, z którym kontaktują się jeszcze 2-3 nitki wyciągane ze struktury. Nitki te dalej ulegają zerwaniu i po 24 μs opór pocisku stanowi jedynie tarcza boczna bocznego pocisku o rozsuwane nitki w otworze. W przypadku przebicia struktury haftowanej czoło pocisku widoczne jest po 16 μs. Widać wyraźnie z badań symulacyjnych i eksperymentalnych, że nitki układu zewnętrznego nie pękły a rozsunęły się na boki po stożkowej części pocisku. Po czasie 40 μs z czołem pocisku kontaktuje się tylko jedna nitka, która jak pokazują badania eksperymentalne, zaczyna się rozdawać i pocisk przechodzi dalej pomiędzy dwoma jej częściami nie zrywając ich. Wynika z tego, że z zewnętrznego układu nitek struktury haftowanej, żadna nie uległa pęknięciu a wszystkie nitki rozsunęły się po stożkowej części pocisku. Na rys. 111 pokazano zdjęcia struktur haftowanej i tkanej po przebicciu pocisku. W przypadku struktury haftowanej nawet nitki kontaktujące się z czołem pocisku nie uległy zerwaniu tylko rozsunęły się. W przypadku struktury tkanej dwie i trzy pęknięte nitki widoczne są odpowiednio w układzie pionowym i poziomym. Wynika z tego, że mocowanie nitek para-aramidowych w procesie haftowania nie zapobiega ich rozsuwaniu się podczas uderzenia pocisku.

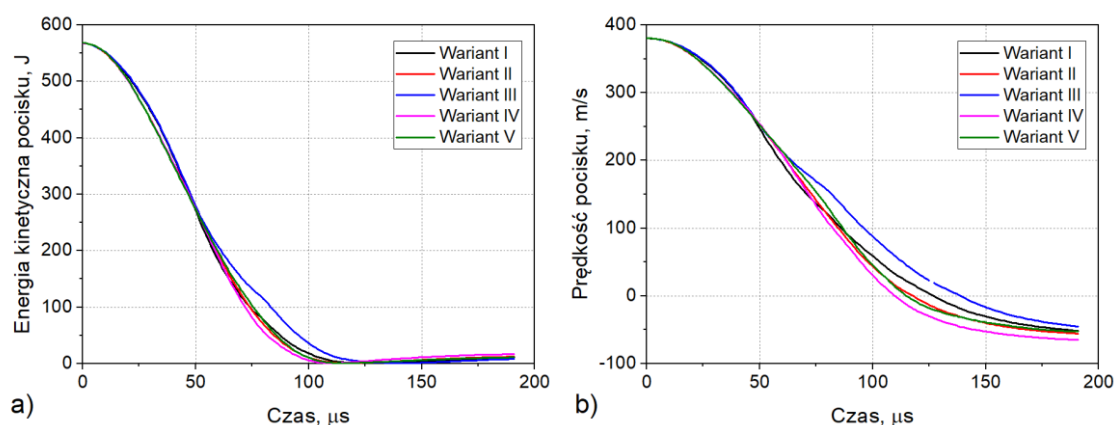


Rys. 111. Zdjęcia struktury haftowanej i tkanej po przebicium pocisku

Należy zatem stwierdzić, że struktury haftowane pod względem odpowiedzi na uderzenie balistyczne mają dwie zalety i jedną wadę. Zaletami są rozprostowane nitki i brak przepłótów sprzyjający dużej prędkości propagacji co wpływa korzystnie na mniejszą deformację poprzeczną pakietu. Wadą tych struktur jest rozsuwanie się nitek w kontakcie z czołem pocisku, co niekorzystnie wpływa na liczbę przestrzelonych warstw w pakiecie balistycznym. Należy zaznaczyć, że intensywność rozsuwania się nitek zależy od kąta powierzchni stożkowej napierającej na strukturę haftowaną. W przypadku wielowarstwowego pakietu balistycznego, rozsuwanie się nitek w kolejnych warstwach będzie mniejsze a w warstwach końcowych w ogóle nie będzie występować. Struktury tkane pod względem odpowiedzi na uderzenie balistyczne mają z kolei zalety i wady, które są przeciwieństwem zalet i wad struktur haftowanych. Zaletą jest tutaj zakleszczona przez przeploty nitek wątku i osnowy struktura, która zapobiega rozsuwaniu się nitek w kontakcie z czołem pocisku. Z kolei wadami tej struktury są wrobieńnięcia nitek wątku i osnowy oraz mniejsza prędkość propagacji fali naprężeń z uwagi na przeplataną strukturę, co sprzyja zwiększonej deformacji poprzecznej. Aby wykorzystać zalety obu struktur i jednocześnie ograniczyć ich wady, zasadne wydaje się złożenie wielowarstwowego hybrydowego pakietu, który z przodu zawiera struktury tkane a tyłu struktury haftowane. Na rys. 123d widoczna jest deformacja poprzeczna w ostatniej warstwie dla tak wykonanego pakietu balistycznego (Wariant IV), który zawierał 13 warstw tkanych z przodu i 13 warstw haftowanych z tyłu. Widać wyraźnie, że maksymalna deformacja jest jeszcze mniejsza niż dla pakietu złożonego z 26 warstw haftowanych (Wariant I) a współczynnik perforacji jest na najniższym poziomie i wynosi odpowiednio 24.6 i 13.5%, biorąc pod uwagę wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych (Rys. 129). Z kolei bardzo niekorzystnym wariantem, uwypuklającym wady struktur tkanych i haftowanych jest konstrukcja wielowarstwowego hybrydowego pakietu zawierająca struktury haftowane z przodu a struktury tkane z tyłu. Na rys. 123c widoczna jest deformacja dla pakietu wykonanego w Wariacie III, w którym 13 warstw haftowanych umieszczono właśnie z przodu i 13 warstw tkanych z tyłu. Maksymalna deformacja była jeszcze większa niż w przypadku ostrzału pakietu złożonego tylko z tkanin (Wariant V) a współczynnik perforacji był na poziomie ok.

52.3 oraz 50%. Odpowiedź pakietów hybrydowych wykonanych w Wariantach IV i III potwierdza istnienie wad i zalet struktur haftowanych i tkanych, ale odpowiednie zarządzanie nimi, pozwala znacząco poprawić własności balistyczne pakietów. Podczas badań ostrzałowemu poddano również pakiet hybrydowy składający się ze struktur tkanych i haftowanych ułożonych naprzemiennie (Wariant II). Na rys. 103b widoczna jest deformacja poprzeczna dla pakietu wykonanego w tym wariacie. Maksymalna wartość deformacji oraz współczynnik perforacji były nieznacznie większe niż dla Wariantu IV, dla którego uzyskano najmniejszą wartości tych parametrów. Ułożenie naprzemiennie warstw może być korzystne z jednej strony z uwagi na zachowanie stabilności pakietu przy ostrzale większą liczbą pocisków, z drugiej, możliwe jest wykonanie struktur haftowanych bezpośrednio na tkaninie para-aramidowej z pominięciem podłoża. Wyeliminowany zostanie wtedy efekt zwiększenia masy pakietu podłożem struktury haftowanej, zwyczajowo stosowanym w postaci włókniny PP. W pakiecie z naprzemiennym ułożeniem warstw, struktury haftowane ułożone w przedniej części pakietu są podatne na rozsuwanie się nitki w kontakcie z pociskiem. Z tego względu rozpraszanie energii kinetycznej pocisku przez te warstwy jest ograniczone. Ma to istotny wpływ na nieznaczne zwiększenie maksymalnej deformacji podłoża balistycznego.

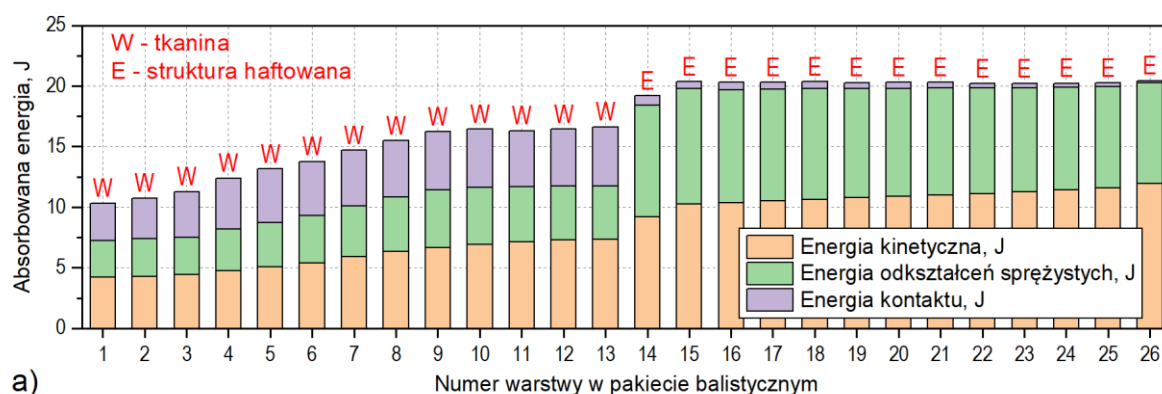
Na rys. 112 przedstawiono energię kinetyczną i prędkość pocisku w funkcji czasu, w zależności od wariantu ułożenia warstw w pakiecie balistycznym uzyskane za pomocą badań numerycznych.

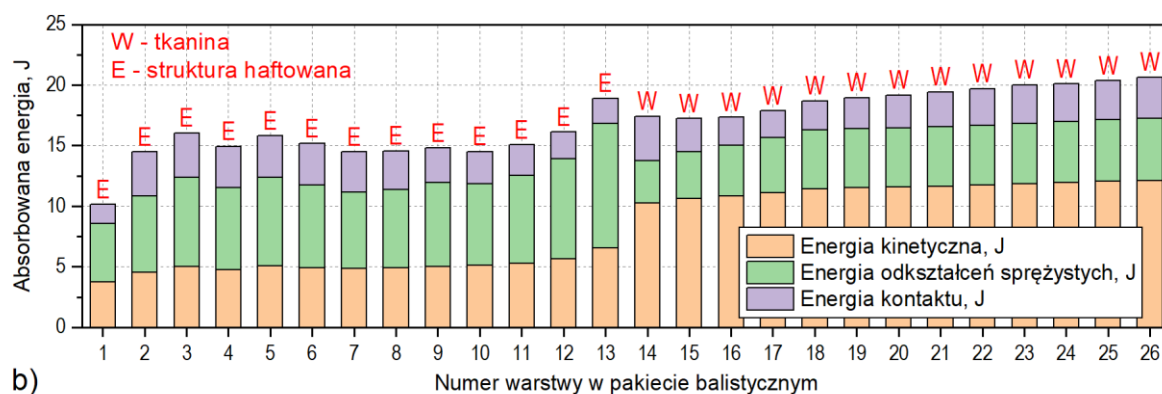


Rys. 112. Energia kinetyczna (a) i prędkość pocisku (b) w funkcji czasu, w zależności od wariantu ułożenia warstw w pakiecie uzyskane za pomocą badań numerycznych

Przeprowadzone badania symulacyjne pokazują, że energia kinetyczna pocisku uderzającego w pakiet balistyczny osiąga wartość zero, co jest równoznaczne z prędkością pocisku równą zero, w czasie zależnym od wariantu wykonania pakietu. Biorąc pod uwagę czas zatrzymania pocisku po uderzeniu w pakiet balistyczny, najbardziej efektywnym pakietem jest pakiet wykonany w Wariacie IV, gdzie pocisk zatrzymuje się po 110 μs. Nieco większe, ale zbliżone czasy zatrzymania pocisku występują podczas uderzenia

pocisku w pakiet wykonany w Wariantach II i V, odpowiednio 115 i 118 μ s. Najgorsze właściwości z punktu widzenia czasu zatrzymania pocisku wykazują pakiety wykonane w wariantach I i III, które wynoszą odpowiednio 127 i 139 μ s. Uzyskana z badań symulacyjnych kolejność wariantów pakietów IV, II, V, I, III zatrzymujących pocisk w czasie od najkrótszego do najdłuższego całkowicie koreluje z wynikami badań eksperymentalnych, przyjmując czas zatrzymania pocisku w chwili wystąpienia największej deformacji poprzecznej pakietu (Rys. 101b). Czasy te dla wariantów pakietów IV, II, V, I, III wynosiły odpowiednio 557, 577, 590, 617 i 818 μ s. Uzyskane wyniki jednoznacznie pokazują, że czas zatrzymania pocisku jest krótszy, jeżeli w pakiecie balistycznym od strony uderzenia pocisku występują warstwy tkane. Z kolei czas zatrzymania pocisku jest dłuższy, jeżeli od strony uderzenia pocisku występują warstwy w postaci struktur haftowanych. Wynika to przede wszystkim z tego, że w strukturach haftowanych stosunkowo łatwo rozsuwają się nitki w kontakcie z czołem pocisku, wskutek czego, ich efektywność mierzona wartością absorbowanej energii jest mniejsza niż w tkaninach, gdzie nitki z uwagi na przeplataną strukturę utrzymują kontakt z czołem pocisku, co powoduje ich rozciąganie i zrywanie i tym samym większą absorpcję energii kinetycznej pocisku. Na rys. 113 przedstawiono energię absorbowaną przez poszczególne warstwy pakietów balistycznych wykonanych w Wariacie IV, który wykazuje najlepszą efektywność balistyczną i w Wariacie III, który cechuje się najgorszą efektywnością spośród wszystkich badanych wariantów pakietów balistycznych. Oba warianty mają jednakową liczbę warstw, po 13 tkanych i 13 haftowanych, ale są one ułożone w odwrotnej kolejności. Energia absorpcji danej warstwy uwzględnia jej energię kinetyczną, energię odkształceń sprężystych oraz energię kontaktu, uwzględniającą również tarcie pomiędzy nitkami wątku i osnowy w przypadku tkaniny i pomiędzy dwoma układami równoległych nitek w strukturze haftowanej.

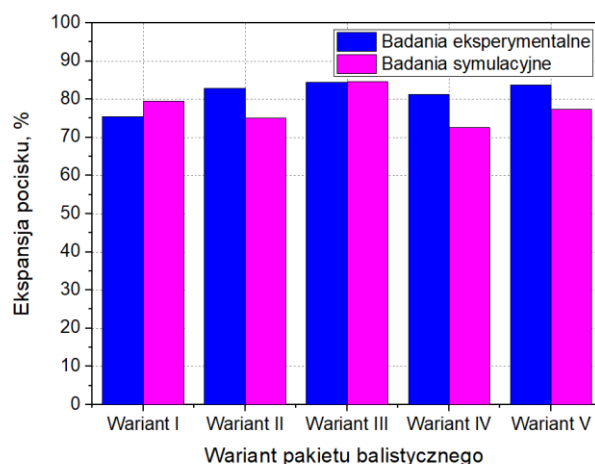




Rys. 113. Rozkład absorbowanej energii przez poszczególne warstwy w pakietach balistycznych wykonanych wariantach: a) Wariant IV, b) Wariant III

Jak widać na rys. 113a w pakiecie wykonanym w Wariacie IV, niezwykle wydajne są struktury haftowane umieszczone z tyłu. Wszystkie te warstwy przejmują ponad 20 J energii kinetycznej pocisku. Największy udział w tej energii ma energia kinetyczna i energia odkształceń sprężystych, natomiast niewielki jest udział energii kontaktu. Warstwy tkane umieszczone z przodu, przejmują energię kinetyczną pocisku narastająco od 10 J dla pierwszej warstwy do ok. 16 J dla 9 warstwy. Dla pozostałych warstw tkanych od 10 do 13, przyjmowana energia pozostaje stała na poziomie ok. 16 J. W przypadku warstw tkanych, znacząco większy jest udział energii kontaktu a mniejszy energii odkształceń sprężystych w porównaniu ze strukturami tkanymi umieszczonymi z tyłu pakietu. W zakleszczonych w przeplotach nitkach tkaniny siły docisku pomiędzy nitkami są znacznie większe niż w strukturach haftowanych, gdzie docisk ten wynika zasadniczo tylko z sił docisku pomiędzy warstwami. W przypadku pakietu wykonanego w Wariacie III (Rys. 113b), struktury haftowane wykazują znacznie większą energię wewnętrzną w stosunku do tkanin, na którą składa się głównie energia odkształceń sprężystych nici tworzących struktury tkane i haftowane. Wynika to głównie z wyprostowanych nici w strukturze haftowanej, które dzięki temu są w stanie przenosić duże naprężenia tuż po zetknięciu z czołem pocisku. W przypadku tkanin, nitki po zetknięciu się z czołem pocisku rozprostowują się w przeplotach i dopiero po rozprostowaniu mogą przenosić naprężenia porównywalne ze strukturą haftowaną.

Na rys. 114 przedstawiono ekspansję pocisku dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych, uzyskanych na podstawie przeprowadzonych badań numerycznych i eksperymentalnych.

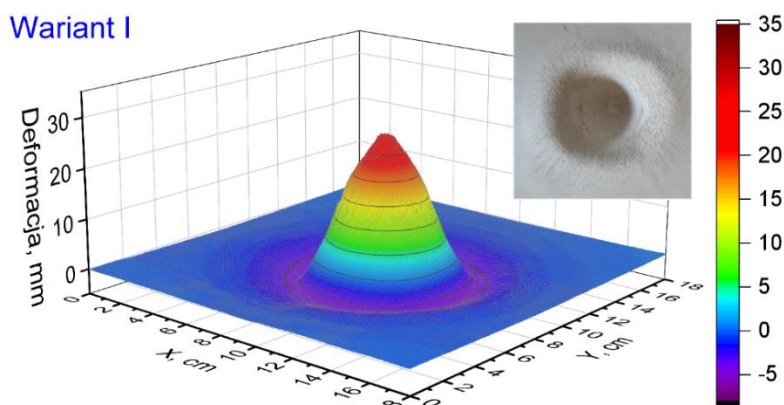


Rys. 114. Ekspansja pocisku dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych

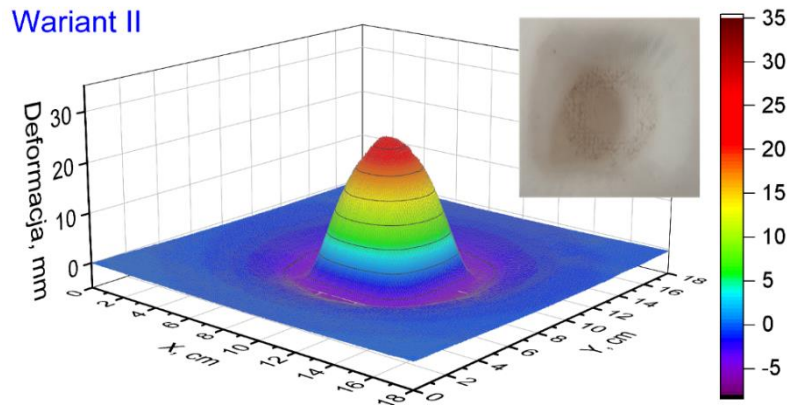
Jak widać na rys. 114, ekspansja pocisku po ostrzale poszczególnych wariantów pakietów balistycznych wynosi od 75 do 84%. Uzyskane wyniki ekspansji pocisków nie wskazują na to, aby struktura warstw i ich ułożenie w różnych wariantach hybrydowych miała znaczący wpływ na deformację pocisku.

5.2. Pakiety osadzone na podłożu plastelinowym

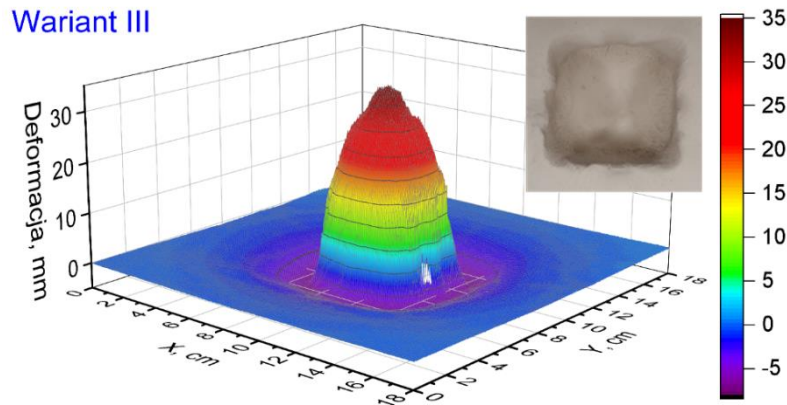
W kolejnej części przeprowadzono badania efektywności balistycznej pakietów wykonane w Wariantach od I do V osadzonych na podłożu plastelinowym i poddanych ostrzałowi pociskami Parabellum 9x19 FMJ, zgodnie z przyjętą metodyką badań eksperymentalnych przedstawioną w rozdziale 5.4. Na rys. 115-119 przedstawiono deformację podłoża plastelinowego po ostrzale poszczególnych wariantów pakietów balistycznych pociskiem Parabellum 9x19 mm z prędkością 380 ± 3 m/s. Deformację przedstawiono w postaci wykresu 3D powstałego z danych pomiarowych zarejestrowanych w procesie skanowania podłoża plastelinowego po ostrzale oraz w postaci widoku podłoża plastelinowego w obszarze stożka odkształcenia.



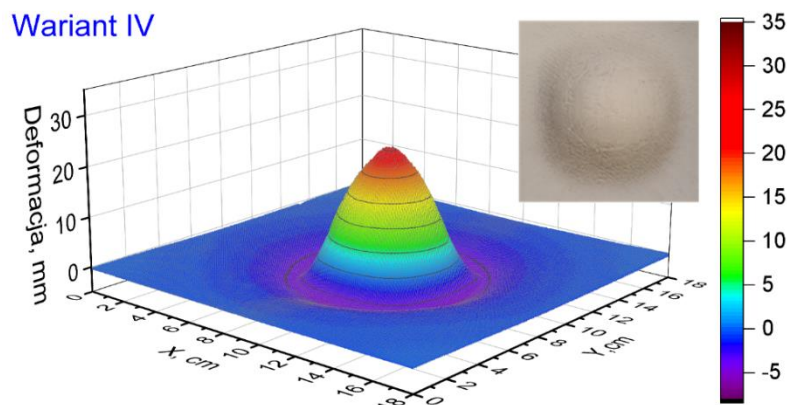
Rys. 115. Deformacja podłoża plastelinowego podczas ostrzału pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu I



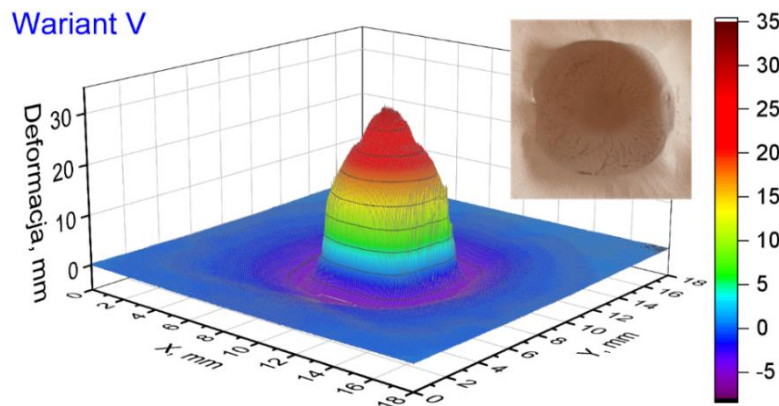
Rys. 116. Deformacja podłoża plastelinowego podczas ostrzału pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu II



Rys. 117. Deformacja podłoża plastelinowego podczas ostrzału pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu III



Rys. 118. Deformacja podłoża plastelinowego podczas ostrzału pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu IV



Rys. 119. Deformacja podłoża plastelinowego podczas ostrzału pakietu balistycznego z ułożeniem warstw według Wariantu V

Porównując deformację podłoża podczas ostrzału pakietu złożonego z 26 warstw struktur haftowanych (Wariant I, rys. 115) z deformacją podczas ostrzału pakietu złożonego z 26 warstw tkanin (Wariant V, rys. 119) widoczne są różnice zarówno w wartościach maksymalnej deformacji jak i kształcie wgłębienia. W przypadku maksymalnej deformacji dla Wariantu I i Wariantu V wyniosła ona odpowiednio 25.9 oraz 30.5 mm. Analizując kształt deformacji należy stwierdzić, że dla Wariantu I ma ona kształt sferyczny ze stosunkowo ostrym zakończeniem a dla Wariantu V kształt deformacji jest zbliżony do ostrosłupa. Takie różnice pomiędzy wariantami należy tłumaczyć różną budową struktury warstw bowiem w obu strukturach występują te same nitki para-aramidowe i masa powierzchniowa jest porównywalna nie wliczając w strukturze haftowanej masy podłoża w postaci włókniny PP oraz masy nici przyhaftowujących przędzę para-aramidową. Strukturę haftowaną (Wariant I) wykonano jako dwa układy nitek w konfiguracji $0/90^\circ$. W tej strukturze nie występuje efekt przeplatania nitek więc z jednej strony, podczas uderzenia pocisku nitki od razu przenoszą duże naprężenia w odróżnieniu od tkaniny (Wariant V), gdzie po uderzeniu pocisku nitki najpierw rozprostowują się i dopiero po tym są zdolne do przenoszenia dużych naprężeń. Procesowi rozprostowywania się nitek w tkaninie towarzyszy zwiększona deformacja poprzeczna, która wpływa na większą deformację podłoża plastelinowego. Z drugiej strony znane są badania prędkości propagacji fali naprężeń w tkaninach, które wskazują, że są one mniejsze od prędkości propagacji fali naprężeń w pojedynczych nitkach z których są wykonane [109-110].

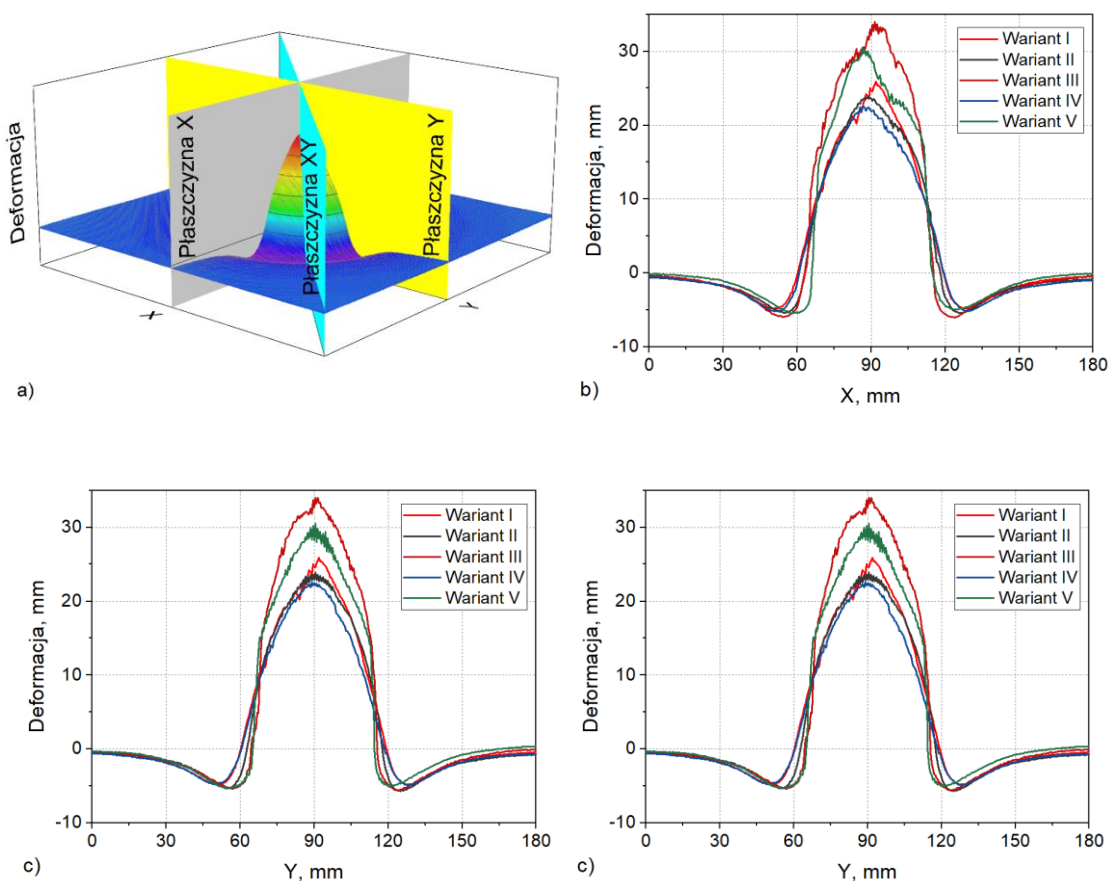
Wpływ na to ma przede wszystkim przeplatana struktura tkaniny. Ponieważ w strukturze haftowanej nie występują przeploty, to można założyć w przybliżeniu, że prędkość rozchodzenia się fali naprężeń w tej strukturze będzie porównywalna jak dla pojedynczej nitki para-aramidowej i większa jak w tkaninie. Większa propagacja fali naprężeń w strukturze haftowanej korzystnie wpływa na zwiększenie obszaru rozłożenia fali naprężeń w płaszczyźnie warstw wokół punktu uderzenia pocisku. Praca warstw na większym

obszarze również sprzyja mniejszej deformacji poprzecznej pakietu balistycznego i w konsekwencji mniejszej deformacji podłoża plastelinowego.

Struktury haftowane pod względem odpowiedzi na udar balistyczny mają dwie zalety i jedną wadę. Zaletami są rozprostowane nitki i brak przeplotów sprzyjający dużej prędkości propagacji, co wpływa korzystnie na mniejszą deformację poprzeczną pakietu. Wadą tych struktur jest rozsuwanie się nitek w kontakcie z czołem pocisku, co niekorzystnie wpływa na liczbę przestrzelonych warstw w pakiecie balistycznym. Należy zaznaczyć, że intensywność rozsuwania się nitek zależy od kąta powierzchni stożkowej napierającej na strukturę haftowaną. W przypadku wielowarstwowego pakietu balistycznego, rozsuwanie się nitek w kolejnych warstwach będzie mniejsze a w warstwach końcowych w ogóle nie będzie występować. Struktury tkane pod względem odpowiedzi na udar balistyczny mają z kolei zalety i wady, które są przeciwieństwem zalet i wad struktur haftowanych. Zaletą jest tutaj zakleszczona przez przeploty nitek wątku i osnowy struktura, która zapobiega rozsuwaniu się nitek w kontakcie z czołem pocisku. Z kolei wadami tej struktury są wrobienie nitek wątku i osnowy oraz mniejsza prędkość propagacji fali naprężeń z uwagi na przeplataną strukturę, co sprzyja zwiększonej deformacji poprzecznej. Aby wykorzystać zalety obu struktur i jednocześnie ograniczyć ich wady, zasadne wydaje się złożenie wielowarstwowego hybrydowego pakietu, który z przodu będzie zawierał struktury tkane a z tyłu struktury haftowane. Na rys. 118 widoczna jest deformacja podłoża plastelinowego dla tak wykonanego pakietu balistycznego (Wariant IV), który zawierał 13 warstw tkanych z przodu i 13 warstw haftowanych z tyłu. Widać wyraźnie, że maksymalna głębokość deformacji jest jeszcze mniejsza niż dla pakietu złożonego z 26 warstw haftowanych (Wariant I, rys. 115) i wynosiła ona 22.6 mm. Z kolei bardzo niekorzystnym wariantem, uwypuklającym wady struktur tkanych i haftowanych byłaby konstrukcja wielowarstwowego hybrydowego pakietu zawierająca struktury haftowane z przodu a struktury tkane z tyłu. Na rys. 117 widoczna jest deformacja podłoża plastelinowego dla pakietu wykonanego w Wariacie III, w którym 13 warstw haftowanych umieszczono właśnie z przodu i 13 warstw tkanych z tyłu. Maksymalna deformacja podłoża była jeszcze większa niż w przypadku ostrzału pakietu złożonego tylko z tkanin (Wariant V, rys. 119) i wynosiła 34.1 mm. Odpowiedź pakietów hybrydowych wykonanych w Wariantach IV i III potwierdza istnienie wad i zalet struktur haftowanych i tkanych, ale odpowiednie zarządzanie nimi, pozwala znacząco poprawić własności balistyczne pakietów. Podczas badań ostrzałowi poddano również pakiet hybrydowy składający się ze struktur tkanych i haftowanych ułożonych naprzemiennie (Wariant II). Na rys. 116 widoczna jest deformacja podłoża plastelinowego dla pakietu wykonanego w tym wariacie. Maksymalna wartość deformacji wynosiła 23.9 mm i była o 1.4 mm większa od Wariantu IV, dla którego uzyskano najmniejszą wartość tej deformacji. Ułożenie naprzemiennie warstw wydaje się korzystne z jednej strony z uwagi na zachowanie stabilności pakietu przy ostrzale większą liczbą pocisków, z drugiej, możliwe jest wykonanie struktur haftowanych bezpośrednio na

tkaninie para-aramidowej z pominięciem podłoża. Wyeliminowany zostanie wtedy efekt zwiększenia masy pakietu podłożem struktury haftowanej, zwyczajowo stosowanym w postaci włókniny polipropylenowej. W pakiecie z naprzemiennym ułożeniem warstw, struktury haftowane ułożone w przedniej części pakietu są podatne na rozsuwanie się nitek w kontakcie z pociskiem. Z tego względu rozpraszanie energii kinetycznej pocisku przez te warstwy jest ograniczone. Ma to istotny wpływ na nieznaczne zwiększenie maksymalnej deformacji podłoża balistycznego.

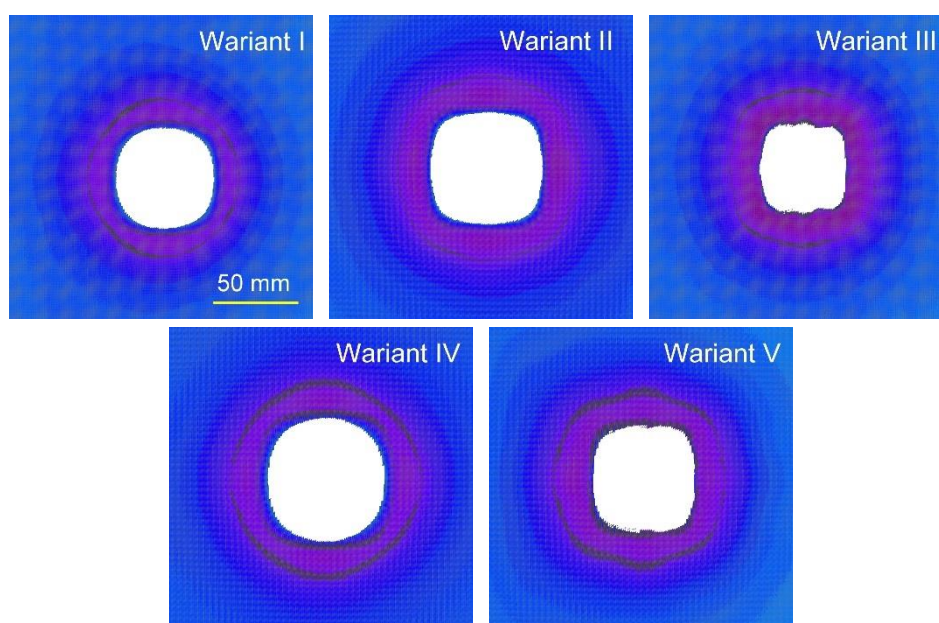
Deformację podłoża balistycznego dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych porównywano w przekrojach poprzecznych. Na rys. 120 przedstawiono wykresy przekrojów poprzecznych przechodzących przez punkt uderzenia pocisku, wykonanych w płaszczyźnie obu układów nitek X i Y oraz w płaszczyźnie 45° w stosunku do układów nitek (Rys. 120a).



Rys. 120. Przekroje poprzeczne podłoża plastelinowego w punkcie uderzenia pocisku dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych: a) schemat podziału podłoża balistycznego według płaszczyzn w osiach X, Y oraz XY, b) przekroje podłoża płaszczyźnie X, c) przekroje podłoża płaszczyźnie Y, d) przekroje podłoża płaszczyźnie XY

Na poszczególnych przekrojach przedstawionych na rys. 120 widoczne są przede wszystkim zróżnicowane, w zależności od wariantu pakietu balistycznego, wartości maksymalnej deformacji podłoża plastelinowego. Celem analizy tych przekrojów była ocena możliwych

zróznicowań w kształcie deformacji z uwagi na przyjęte warianty ułożenia warstw w pakietach balistycznych. Analizując szerokość jam wlotowych w płaszczyznach X, Y dla wartości deformacji równej zero (Rys. 120b-c), nie widać jakichś istotnych zróznicowań dla tego samego pakietu balistycznego. Najmniejsze wymiary jam wlotowych i jednocześnie największe maksymalne deformacje występują dla Wariantu III i V. Są to pakiety balistyczne złożone z samych tkanin (Wariant V) i lub zawierające warstwy tkane w tylnej części (Wariant III). Prawdopodobną przyczyną tego jest koncentracja naprężeń w tkaninie podczas uderzenia pocisku na mniejszej powierzchni w stosunku do struktur haftowanych z uwagi na mniejszą prędkość propagacji fali naprężeń. Ten sam efekt jest również widoczny w płaszczyźnie XY. Z kolei najszersza jama wlotowa występuje przy ostrzale pakietów wykonanych w Wariantach II i IV. Przy ostrzale tych pakietów występuje jednocześnie najmniejsza maksymalna deformacja podłoża balistycznego. Wynika z tego, że z uwagi na występowanie dużej liczby struktur haftowanych w tylnej części pakietu, w chwili uderzenia pocisku naprężenia rozchodzą się w tych strukturach z większą prędkością, co wpływa na rozłożenie deformacji poprzecznej na większym obszarze pakietu balistycznego ograniczając jednocześnie maksymalne wartości tej deformacji. Na rys. 121 pokazano kształt jam wlotowych na poziomie zerowym podłoża plastelinowego przy ostrzale pakietów wykonanych w założonych wariantach.

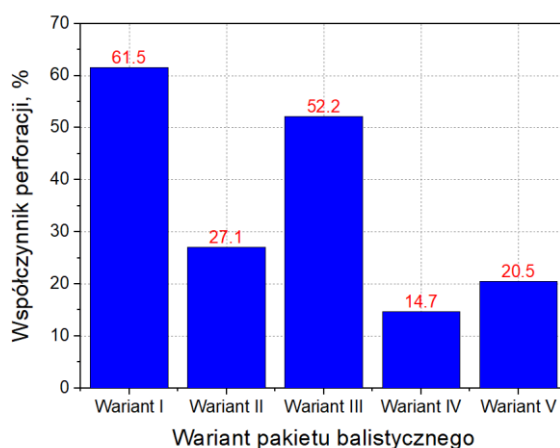


Rys. 121. Jamy wlotowe na zerowym poziomie podłoża plastelinowego przy ostrzale pakietów wykonanych w założonych wariantach.

W kształcie tych jam wlotowych występuje prawidłowość, że struktury haftowane przyczyniają się do występowania jam wlotowych okrągłych a tkane do kwadratowych. Jama wlotowa dla Wariantu I (złożonego z 26 warstw haftowanych) jest praktycznie okrągła, z kolei dla Wariantu V (złożonego z 26 warstw tkanych) zbliżona do kwadratu. Podobnie

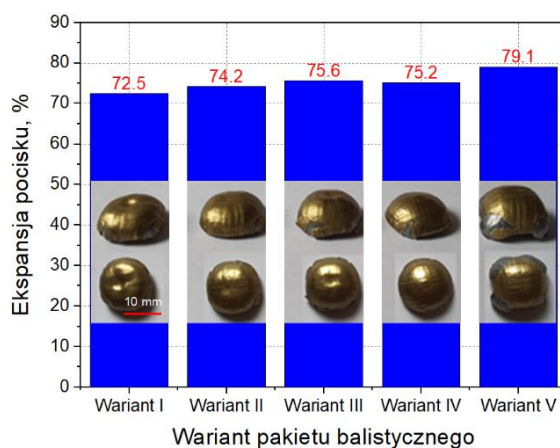
dla Wariantu IV zawierającego 13 warstw haftowanych z tyłu kształt jamy jest okrągły a dla Wariantu III zawierającego 13 warstw tkanych z tyłu, kształt jest zbliżony do kwadratu. W przypadku jamy dla Wariantu II ma ona kwadratowo-okrągły kształt, co jest efektem zastosowania naprzemiennego układu warstw haftowanych i tkanych. Wydaje się, że przyczyną większego obszaru deformacji w płaszczyźnie XY w stosunku do płaszczyzn X i Y w przypadku tkanin umieszczonych w tylnej części pakietu jest przeplatana struktura tkaniny, która przyczynia się do przenoszenia deformacji poprzecznej w obszary nitek nie kontaktujące się bezpośrednio z czołem pocisku.

Na rys. 122 przedstawiono stopień perforacji dla badanych wariantów pakietów balistycznych podczas ich ostrzału na podłożu plastelinowym.



Rys. 122. Współczynnik perforacji dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych

Jak widać na rys. 122, największy stopień perforacji występuje dla pakietów balistycznych wykonanych w Wariacie I i III i wynosi odpowiednio 61.5 i 52.5%. Przede wszystkim wynika to z zastosowania warstw haftowanych w przedniej części pakietu od strony uderzenia pocisku. Jak pokazano w rozdziale 3.2, te struktury cechują się zdolnością do rozsuwania nitek w kontakcie z pociskiem i ich skuteczność balistyczna w takim układzie jest mocno ograniczona.

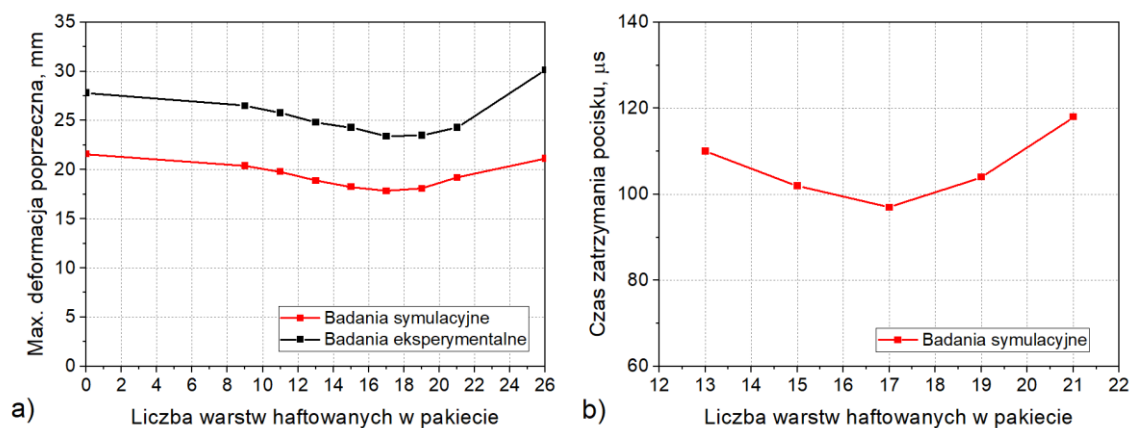


Rys. 123. Ekspansja i widok pocisków po uderzeniu dla poszczególnych wariantów pakietów balistycznych

W przypadku pozostałych pakietów współczynniki perforacji są znacznie mniejsze, nie przekraczające 28%, co wynika z umieszczenia dużej liczby warstw tkanych w przedniej części pakietu od strony uderzenia pocisku. Z uwagi na przeplataną strukturę, nitki wątku i osnowy nie rozsuwają się w punkcie uderzenia pocisku co powoduje ich skuteczność w ograniczaniu perforacji pakietu balistycznego. Najmniejszy współczynnik perforacji 14.7% występuje przy ostrzale pakietu wykonanego w Wariacie IV, dla którego obserwuje się również najmniejszą maksymalną deformację i największą powierzchnię jamy wlotowej. Pocisk w tej strukturze zatrzymuje się na 5 warstwie, co należy uznać za znakomity wynik, bowiem pocisk przebija tylko 4 z 26 warstw pakietu. Dla porównania dla pakietu wykonanego tylko z tkanin (Wariant V) pocisk zatrzymuje się na 6-7 warstwie. Zastosowane w Wariacie IV struktury haftowane szybko przejmują energię kinetyczną pocisku z uwagi na rozprostowane nitki, ograniczając w ten sposób energię kinetyczną pocisku oddziaływującego na struktury tkane. Na rys. 123 przedstawiono widok przykładowych pocisków i ekspansję pocisków po uderzeniu w pakiety balistyczne wykonane w założonych wariantach i umieszczone na podłożu plastelinowym. Jak widać na rys. 123, ekspansja pocisków po ostrzale poszczególnych wariantów pakietów balistycznych jest bardzo podobna i zawiera się w zakresie od 72.5 do 79.1%. Uzyskane wyniki ekspansji pocisków są na tyle zbliżone, że trudno przypisać im wpływ struktury warstw i ułożenia warstw w poszczególnych pakietach balistycznych.

5.3. Optymalizacja pakietu balistycznego wykonanego w Wariacie IV

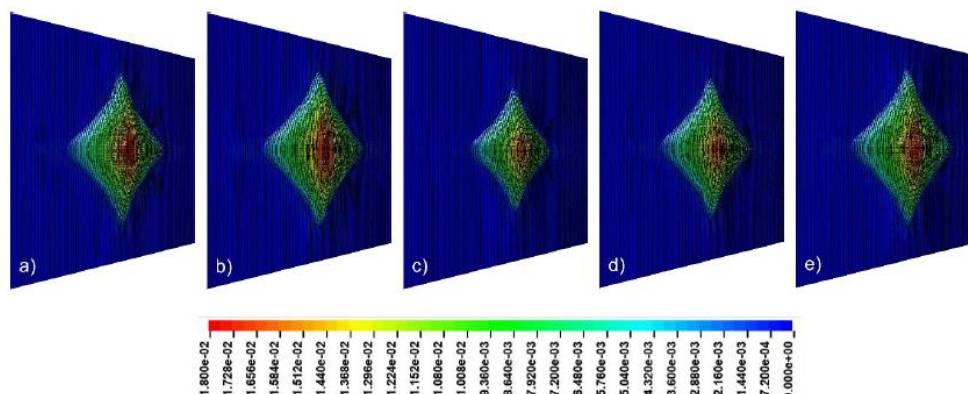
Przeprowadzone badania pakietów balistycznych wykonanych w Wariantach od I do V wykazały, że największą efektywność balistyczną wykazuje pakiet wykonany w Wariacie IV, w którym 13 warstw tkanych znajdowało się od strony uderzenia pocisku a 13 warstw haftowanych od strony tylnej. Pakiet ten zarówno w badaniach symulacyjnych jak i eksperymentalnych najszybciej zatrzymuje pocisk, ma najmniejszą perforację warstw oraz najmniejszą deformację poprzeczną pakietu. W dalszej części przeprowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne, modyfikując w tym pakiecie stosunek liczby warstw tkanych do liczby warstw haftowanych, w celu znalezienia optymalnej wartości zapewniającej największą efektywność balistyczną, przy zachowaniu całkowitej liczby warstw w pakiecie równej 26. Na rys. 124 przedstawiono wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych maksymalnej deformacji poprzecznej oraz wyniki badań symulacyjnych czasu zatrzymania pocisku dla pakietów zamocowanych w ramach stalowych i zawierających zróżnicowaną liczbę warstw tkanych w stosunku do warstw haftowanych. Wartość zero na osi poziomej oznacza, że pakiet zawierał 26 warstw tkanych i 0 warstw haftowanych, z kolei wartość 26 na osi oznacza, że pakiet zawierał 0 warstw tkanych i 26 warstw haftowanych.



Rys. 124. Wpływ liczby warstw haftowanych na: a) deformację poprzeczną pakietu balistycznego, b) czas zatrzymania pocisku

Badania symulacyjne i eksperymentalne przedstawione na rys. 124 pokazują, że wraz ze wzrostem liczby warstw haftowanych i jednoczesnym zmniejszeniem liczby warstw tkanych w pakiecie balistycznym, tak aby zachować całkowitą liczbę warstw równą 26, maksymalna deformacja poprzeczna maleje i jest najmniejsza dla pakietu zawierającego 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych (Rys. 124a). Dalsze zwiększanie liczby warstw haftowanych przy jednoczesnym zmniejszeniu liczby warstw tkanych powoduje zwiększenie maksymalnej deformacji poprzecznej pakietów. Przyczyną tego jest częściowa lub całkowita perforacja warstw tkanych, która dalej powoduje rozsuwanie się nitek w warstwach haftowanych znajdujących się w kolejności tuż za warstwami tkanymi. Analiza czasu potrzebnego do zatrzymania pocisku również pokazuje, że pakiet balistyczny zawierający 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych zatrzymuje pocisk w najkrótszym czasie po ok. 97 µs (Rys. 124b). Jest to wartość mniejsza niż w pakiecie wykonanym w Wariancie IV, zawierającym 13 warstw tkanych i 13 warstw haftowanych, dla którego wynosiła on 110 µs. Zwiększanie liczby warstw haftowanych znacząco przyczynia się do zmniejszenia maksymalnej deformacji pakietu. Jest jednak dla tego typu pakietu hybrydowego graniczna wartość liczby warstw haftowanych, powyżej której deformacja zaczyna się zwiększać. Warstwy tkane, które mają tę wadę, że są podatne na deformację poprzeczną z uwagi na przeplataną strukturę, pełnią jednak istotną rolę w zatrzymaniu pocisku poprzez niedopuszczenie do perforacji warstw haftowanych, na co są bardzo podatne z uwagi na rozsuwanie się nitek. Badania pokazały, że zwykle całkowitej perforacji ulega 4-5 warstw tkanin, jednak liczba tych warstw musi być większa, aby kąt stożka tworzącego się pomiędzy warstwą tkaną a haftowaną był na tyle duży, aby nie następowało zwiększone rozsuwanie się nitek w strukturach haftowanych. Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że w optymalnej strukturze hybrydowej, liczba warstw tkanych powinna wynosić $2p$, gdzie p jest liczbą warstw tkanych, które podczas ostrzału uległy całkowitej penetracji. Na rys. 125 przedstawiono widok stożków

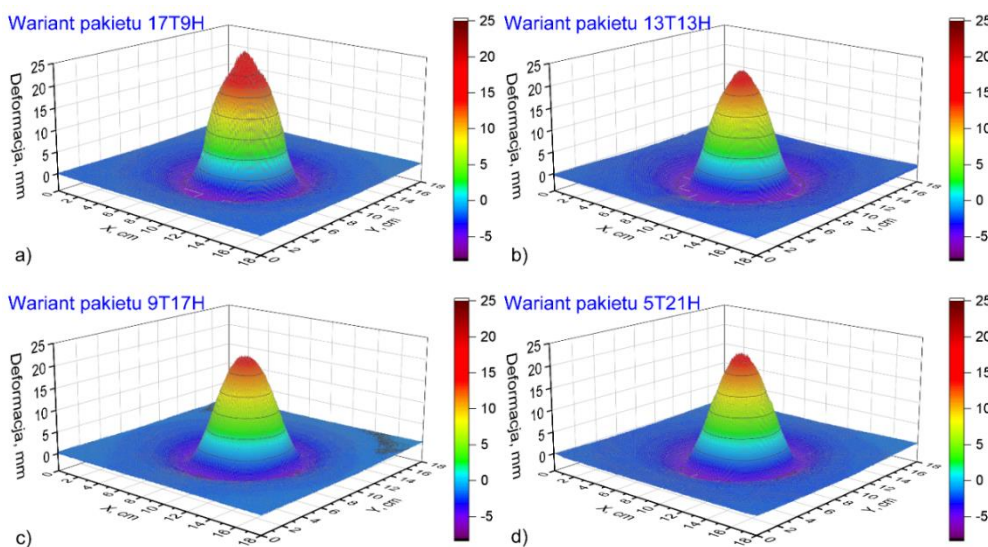
odkształcenia w chwili zatrzymania pocisku w badaniach numerycznych dla pakietów hybrydowych zawierających odpowiednio 13, 15, 17, 19 i 21 warstw haftowanych.



Rys. 125. Widok stożków odkształcenia w chwili zatrzymania pocisku w badaniach numerycznych dla pakietów hybrydowych zawierających różnicowaną liczbę warstw haftowanych: a) 13, b) 15, c) 17, d) 19, e) 21

Jak widać na rys. 125c, optymalna struktura pakietu zawierająca 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych cechuje się nie tylko najmniejszą deformacją poprzeczną, ale również najmniejszym niezerowym obszarem deformacji poprzecznej w chwili zatrzymania pocisku.

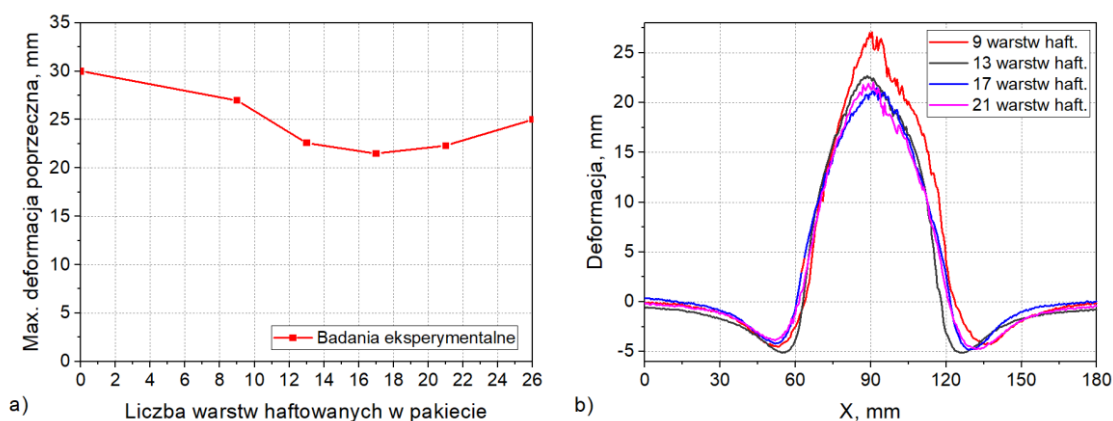
Badania optymalizacyjne pakietu wykonanego w Wariancie IV przeprowadzono również na znormalizowanym podłożu balistycznym według metodyki przedstawionej w rozdziale 4.4. W tym celu wykonano pakiety hybrydowe zawierające odpowiednio 9, 13, 17 i 21 warstw haftowanych. Ostrzał pakietów prowadzono pociskiem Parabellum 9x19 FMJ z prędkością pocisku 380 ± 3 m/s, po osadzeniu pakietu na wykalibrowanym podłożu plastelinowym. Na rys. 126 przedstawiono deformację podłoża plastelinowego dla pakietów zawierających 9, 13, 17 i 21 warstw struktur haftowanych.



Rys. 126. Deformacja podłoża plastelinowego dla pakietów zawierających: a) 9, b) 13, c) 17 i d) 21 warstw struktur haftowanych

Jak widać na rys. 126, kształt deformacji podłoża plastelinowego dla wariantów pakietów zawierających 9, 13, 17 i 21 warstw struktur haftowanych jest podobny. Zmienia się jedynie jego maksymalna wysokość, która jest największa dla pakietu zawierającego 9 warstw struktur haftowanych (Rys. 126a) a najmniejsza dla pakietu zawierającego 17 warstw struktur haftowanych (Rys. 126b). Występuje więc tutaj całkowita zgodność z badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi w warunkach zamocowania pakietów w ramach, gdzie pakiet hybrydowy zawierający 17 warstw struktur haftowanych z tyłu i 8 warstw tkanych z przodu wykazywał najmniejszą deformację tylnej strony pakietu balistycznego (Rys. 124a).

Na rys. 127 pokazano wpływ liczby warstw haftowanych na maksymalną deformację podłoża plastelinowego oraz na kształt deformacji podłoża plastelinowego w płaszczyźnie uderzenia pocisku dla badanych wariantów pakietów balistycznych.



Rys. 127. Wpływ liczby warstw haftowanych na: a) maksymalną deformację podłoża balistycznego, b) kształt deformacji podłoża plastelinowego w płaszczyźnie uderzenia pocisku

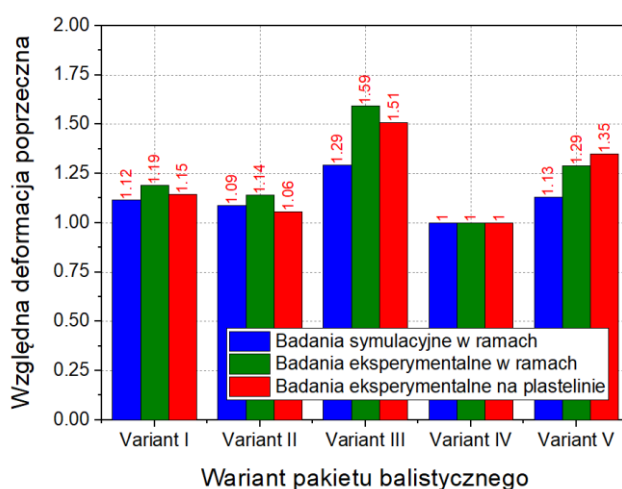
W przypadku skrajnych punktów na rys. 127a, odnoszą się one do maksymalnej deformacji podłoża plastelinowego dla pakietów zawierających 0 i 26 warstw struktur haftowanych, czyli do pakietu wykonanego tylko z tkanin (Wariant V) i pakietu wykonanego tylko ze struktur haftowanych (Wariant I). Jak pokazano w poprzednim rozdziale pracy, maksymalne wartości deformacji podłoża dla tych pakietów wynosiły odpowiednio 30.5 i 25.9 mm. Jak widać na rys. 127a, wraz ze wzrostem liczby warstw haftowanych maksymalna deformacja podłoża maleje aż do pakietu zawierającego w tylnej części 17 warstw struktur haftowanych, dla którego wynosi ona 21.5 mm. Jest to związane z korzyściami jakie obserwuje się po dodaniu do fazy tkanej, fazy haftowanej w tylnej części pakietu balistycznego. Przede wszystkim rozprostowane nitki struktur haftowanych przenoszą naprężenia z większą prędkością a brak przeplotów powoduje ograniczanie deformacji poprzecznej pakietu podczas uderzenia pocisku. Biorąc pod uwagę zjawiska jakie zachodzą na granicy faz dla takiej struktury (Rys. 127) prawdopodobne jest, że w pakiecie balistycznym zawierającym 17 warstw struktur haftowanych, we wszystkich tych warstwach nitki nie ulegają ani pękaniu ani rozsuwaniu się podczas uderzenia pocisku. Z tego może wynikać największa

skuteczność w absorbowaniu energii kinetycznej pocisku przez ten pakiet. Powyżej tej wartości maksymalna deformacja podłoża plastelinowego zaczyna wzrastać aż do wartości 25.9 mm dla pakietu złożonego tylko z 26 warstw struktur haftowanych. To narastanie jest związane ze zmniejszającą się liczbą warstw tkanych od strony uderzenia pocisku co powoduje, że podczas ostrzału wszystkie lub większość tych warstw ulega całkowitej penetracji co powodują łatwiejsze rozsuwanie się nitek w dalszych strukturach haftowanych i zwiększoną tym samym deformację podłoża plastelinowego.

Na rys. 127b pokazano deformację podłoża plastelinowego w przekroju poprzecznym wzdłuż osi Y. Należy stwierdzić, że kształt deformacji podłoża jest podobny dla wszystkich badanych wariantów pakietów. Różnice występują jedynie w maksymalnej deformacji podłoża, która jest największa dla pakietu zawierającego 9 warstw struktur haftowanych z tyłu a najmniejsza dla pakietu zawierającego 17 warstw struktur haftowanych z tyłu. Wielkość jamy wlotowej na bazowym zerowym poziomie deformacji jest porównywalna dla wszystkich wariantów pakietów.

6. DYSKUSJA WYNIKÓW BADAŃ

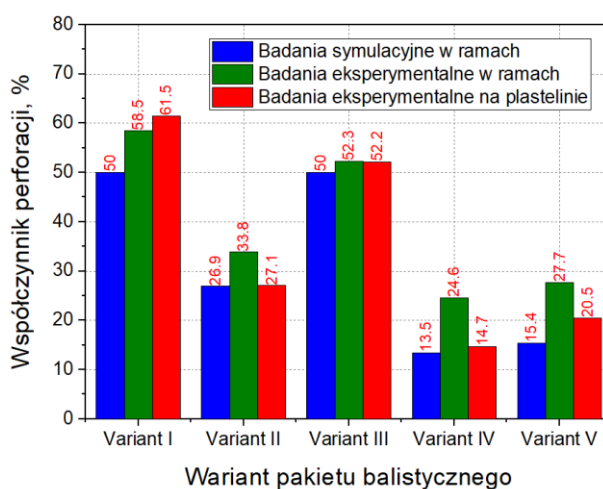
W pierwszym etapie prowadzono badania symulacyjne i eksperymentalne uderzenia pocisku Parabellum 9x19 FMJ w pakiety balistyczne wykonane zgodnie z założoną kolejnością warstw i zamocowane w ramach stalowych. Zamocowanie warstw w ramach stalowych modelowano w badaniach symulacyjnych poprzez uwięzienie z czterech stron w modelu numerycznym pakietu wszystkich brzegowych węzłów. Przeprowadzone badania eksperymentalne ostrzału pakietów zamocowanych w ramach stalowych pokazały, że występuje efekt częściowego wysuwania się warstw pakietu z ram stalowych, co znacząco wpływa na odpowiedź balistyczną pakietu. Efekt ten jest znany i opisywany w literaturze i pomimo dołożenia wszelkich starań w metodyce badań, nie udało się go całkowicie wyeliminować. Wysuwanie się warstw znacząco zwiększa maksymalną deformację poprzeczną pakietu balistycznego, powoduje zatrzymanie pocisku w dłuższym czasie i formowanie się stożka odkształcenia na większej powierzchni w danej chwili czasowej niż wynika to z badań symulacyjnych. Z tego względu porównywano wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych podczas badań pakietów zamocowanych w ramach stalowych w aspekcie efektywności balistycznej poszczególnych wariantów pakietów balistycznych. Jako wskaźniki efektywności brano pod uwagę maksymalną deformację poprzeczną pakietu, czas zatrzymania pocisku, równoznaczny z osiągnięciem zerowej energii kinetycznej pocisku, współczynnik perforacji oraz ekspansję pocisku. Biorąc pod uwagę te wskaźniki należy stwierdzić, że pomiędzy badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi wystąpiła pełna zgodność. W obu tych badaniach największą efektywność balistyczną osiągnął pakiet wykonany w Wariancie IV składający się z hybrydowego połączenia 13 warstw tkanych z przodu i 13 warstw struktur haftowanych z tyłu. Z kolei najmniejszą efektywność balistyczną wykazał pakiet wykonany w Wariancie III o odwrotnym połączeniu warstw w stosunku do Wariantu IV.



Rys. 128. Względna deformacja poprzeczna w zależności od wariantu ułożenia warstw w pakiecie i rodzaju badań

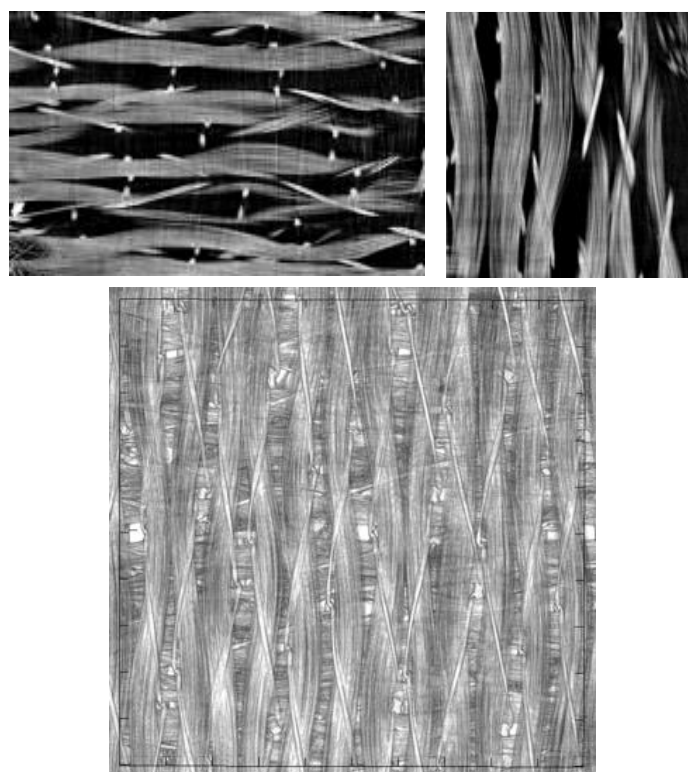
Na rys. 128 przedstawiono względną maksymalną deformację poprzeczną pakietu balistycznego wykonanego w danym wariacie ułożenia warstw w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych po jego zamocowaniu w ramach oraz maksymalną deformację podłoża plastelinowego w przypadku badania tych pakietów na kalibrowanym podłożu plastelinowym. Względne wartości uzyskano poprzez podzielenie deformacji przez najmniejszą deformację uzyskaną w danym rodzaju badań. Najmniejsza wartość deformacji zawsze występowała dla pakietu balistycznego wykonanego w Wariancie IV, zarówno w badaniach symulacyjnych i eksperymentalnych po zamocowaniu pakietu w ramach stalowych jak i w badaniach eksperymentalnych po ostrzale pakietu ułożonego na kalibrowanym podłożu plastelinowym. Stąd wynikają wszystkie wartości względnej maksymalnej deformacji równe 1 dla pakietu balistycznego wykonanego w Wariancie IV we wszystkich tych badaniach. Jak wynika z rys. 128 wszystkie przeprowadzone badania potwierdziły, że największą efektywnością cechuje się pakiet wykonany w Wariancie IV a najmniejszą pakiet wykonany w Wariancie III.

Na rys. 129 przedstawiono dla porównania współczynnik perforacji w zależności od wariantu ułożenia warstw w pakiecie i rodzaju badań. Wyniki badań współczynnika perforacji w danej metodyce badań pokazują, że najmniejsza wartość tego współczynnika jest najmniejsza dla pakietu wykonanego w Wariancie IV. Z kolei największe wartości, powyżej 50%, obserwowano dla pakietów wykonanych w Wariantach I i III. Jasno wynika z tego, że w przypadku ułożenia struktur haftowanych od strony uderzenia pocisku, następuje znacząca perforacja warstw wynikające z rozsuwania się nitki w kontakcie z czołem pocisku. Biorąc pod uwagę maksymalny dopuszczalny współczynnik perforacji na poziomie 25-30%, tylko pakiety wykonane w Wariantach II, IV i V mogą być rozważane do zastosowań praktycznych w kamizelkach kuloodpornych.



Rys. 129. Współczynnik perforacji w zależności od wariantu ułożenia warstw w pakiecie i rodzaju badań

Podczas realizacji badań struktury haftowane wykonywano na hafciarce z użyciem metody haftu TFP, która polega na mocowaniu nitki podawanej z nawoju za pomocą nici przyszywającej. Analizowano, czy igła przesywająca przenikająca przez strukturę nitek para-aramidowych nie powoduje zrywania włókien i zmniejszenia tym samym wytrzymałości tych nitek na zerwanie. Dzięki dobraniu odpowiednich parametrów skoku igły przy wytwarzaniu pierwszej warstwy pod kątem 0° , igła całkowicie omijała przędzę para-aramidową przy jej mocowaniu ścięciem zygzakowym. Przy wytwarzaniu kolejnej warstwy pod kątem 90° , nitki w tej warstwie podobnie jak w pierwszej nie były przebijane przez igłę, jednak następowało przebijanie nitek w pierwszej warstwie. W celu zweryfikowania, czy igła podczas procesu haftowania niszczy włókna przędzy para-aramidowej wykonano dodatkowe badania mikrotomografii komputerowej struktury haftowanej. Obrazy zostały wykonane przy pomocy mikrotomografu Bruker Skyscan 1272 (USA). Na rys. 130 przedstawiono otrzymane obrazy oraz rekonstrukcję 3D struktury haftowanej.



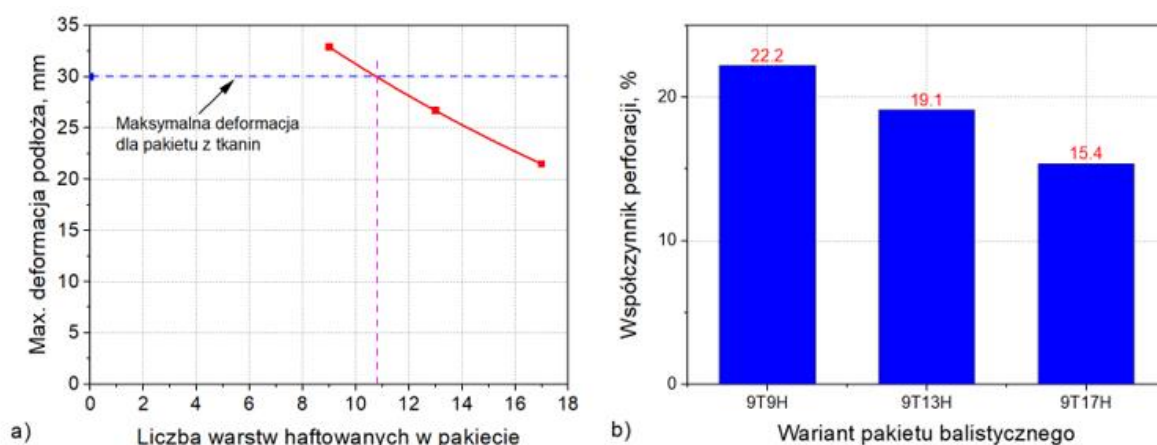
Rys. 130. Obrazy struktury haftowanej otrzymane z mikrotomografii komputerowej

Badania nie dają jednoznacznej odpowiedzi czy włókna przędzy para-aramidowej podczas przechodzenia igły ulegają zerwaniu. Przeprowadzona dodatkowa obserwacja pod mikroskopem nie wskazuje na proces zrywania się włókien przędzy para-aramidowej podczas procesu haftowania.

W ostatnim etapie badań najbardziej efektywny pakiet wykonany w Wariancie IV poddano optymalizacji w celu znalezienia optymalnej granicy faz tkanej i haftowanej.

W pakiecie wykonanym według Wariantu IV, granica tych faz była w środku pomiędzy 13 i 14 warstwą. Badania na kalibrowanym podłożu plastelinowym pokazały, że największą efektywnością cechuje się pakiet zawierający 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych. Potwierdziły to zarówno badania symulacyjne jak i eksperymentalne w warunkach zamocowania pakietu w ramach stalowych oraz badania eksperymentalne w warunkach ułożenia pakietu na kalibrowanym podłożu plastelinowym.

Na etapie analizowania i dyskusji otrzymanych wyników badań, przeprowadzono również badania polegające na ocenie o ile można zmniejszyć liczbę warstw haftowanych w pakiecie najbardziej optymalnym zawierającym bazowo 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych, aby uzyskać deformację podłoża plastelinowego porównywalną przy ostrzale pakietu wykonanego w Wariancie V, zawierającego tylko tkaniny Twaron CT709 w swojej strukturze. Na rys. 131a przedstawiono maksymalną deformację podłoża plastelinowego dla pakietów zawierających 9 warstw tkanin z przodu i odpowiednio 9, 13 i 17 warstw haftowanych z tyłu.



Rys. 131. Maksymalna deformacja podłoża plastelinowego (a) oraz współczynnik perforacji (b), dla pakietów zawierających 9 warstw tkanin z przodu i odpowiednio 9, 13 i 17 warstw haftowanych z tyłu

Biorąc pod uwagę, że maksymalna deformacja podłoża plastelinowego dla pakietu złożonego z 26 warstw tkanych wynosi 30.5 mm, tylko pakiet złożony z 9 warstw tkanych i 9 warstw haftowanych wykazuje większą deformację podłoża, 32.9 mm. Dla pozostałych dwóch pakietów deformacja podłoża jest mniejsza, odpowiednio 26.7 i 21.5 mm. Uzyskane wyniki aproksymowano funkcją eksponentyjalną, na podstawie, której ustalono, że pakiet hybrydowy złożony z 20 warstw w układzie, 9 warstw tkanin z przodu i 11 warstw haftowanych z tyłu, będzie wykazywał poziom deformacji podłoża plastelinowego na takim samym poziomie jak pakiet złożony z 26 warstw tkanin. Należy zaznaczyć, że wraz ze zmniejszeniem się liczby warstw haftowanych wzrasta współczynnik perforacji (Rys. 131b), obserwowano jednak stałą wartość przeбитych warstw tkanych we wszystkich wariantach na poziomie 3-4 warstw. Wartości współczynnika perforacji nawet dla wariantu pakietu 9T9H są jednak bardzo dobre, na poziomie 22.2%. W praktycznym zastosowaniu oznacza to, że

pakiet będzie zawierał 6 warstw mniej, co wiąże się z korzyściami wynikającymi z ograniczenia masy powierzchniowej pakietu. Trudno jest jednak ocenić na tym etapie o ile ta masa może być mniejsza, bowiem w ramach pracy nie optymalizowano struktur haftowanych pod względem masy powierzchniowej. Struktura haftowana będzie mieć zawsze większą masę powierzchniową w stosunku do tkaniny, przy tym samym udziale masowym przędzy para-aramidowej w obu strukturach. Wynika to z konieczności zastosowania podłoża włókninowego w strukturach haftowanych i nici przyhaftowujących. Jak wspomniano, w pracy nie skupiano się na działaniach minimalizujących masę wynikającą z tych elementów.

7. WNIOSKI KOŃCOWE

Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne efektywności balistycznej pakietów balistycznych z udziałem struktur haftowanych pozwoliły na udowodnienie tezy pracy, że istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych. Biorąc pod uwagę uzyskane wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych z pracy wynikają następujące wnioski końcowe:

1. Przeprowadzone badania symulacyjne i eksperymentalne ostrzału pociskiem Parabellum 9x19 FMJ pakietów balistycznych wykonanych w Wariantach od I do V i zamocowanych w ramach stalowych pokazują, że największą efektywność balistyczną wykazuje pakiet hybrydowy wykonany w Wariacie IV, który zawierał 13 warstw tkanin Twaron CT709 od strony pocisku i 13 warstw struktur haftowanych z tyłu. Pakiet ten podczas ostrzału w badaniach numerycznych i eksperymentalnych cechował się najmniejszą deformacją poprzeczną na poziomie odpowiednio 19.0 i 24.1 mm, najkrótszym czasem zatrzymania pocisku, odpowiednio 110 i 520 μ s, i najmniejszą perforacją, odpowiednio 13.5 i 24.6%.
2. Przeprowadzone badania eksperymentalne ostrzału pociskiem Parabellum 9x19 FMJ pakietów balistycznych wykonanych w Wariantach od I do V i ułożonych na kalibrowanym podłożu plastelinowym Roma No. 1 również pokazują, że największą efektywność balistyczną wykazuje pakiet hybrydowy wykonany w Wariacie IV. Pakiet ten podczas ostrzału w badaniach eksperymentalnych powodował najmniejszą deformację podłoża plastelinowego wynoszącą na poziomie odpowiednio 22.6 mm i cechował się najmniejszym współczynnikiem perforacji wynoszącym 14.7%.
3. Przeprowadzone badania optymalizacyjne pakietu balistycznego wykonanego w Wariacie IV, polegające na znalezieniu granicy pomiędzy fazą tkaną a fazą haftowaną pokazały, że pakiet balistyczny zawierający 9 warstw tkanin od strony uderzenia pocisku i 17 warstw haftowanych z tyłu, wykazuje jeszcze większą efektywność balistyczną niż pakiet wykonany w Wariacie IV. Dla tego pakietu deformacja podłoża plastelinowego wynosiła 21.5 mm a w badaniach symulacyjnych dla tego pakietu odnotowano mniejszą deformację poprzeczną i krótszy czas zatrzymania pocisku niż w takich samych badaniach wykonanych dla pakietu w Wariacie IV.
4. W strukturach hybrydowych łączących tkaniny i struktury haftowane istnieje konieczność stosowania tkanin od strony uderzenia pocisku. Struktury haftowane wykazują zdolność do rozsuwania się nitki w kontakcie z czołem pocisku. Ma to znaczący wpływ na efektywność balistyczną pakietów. Badania wykazały znacząco gorszą efektywność balistyczną pakietów zawierających struktury haftowane od

strony uderzenia pocisku. Przeprowadzone badania wskazują, że liczba warstw tkanych w strukturze pakietu hybrydowego powinna być równa dwukrotności liczby warstw przebitych.

5. Pakiet hybrydowy zawierający w sumie 20 warstw, w tym 9 warstw tkanych i 11 warstw haftowanych, wykazuje się podobną skutecznością balistyczną jak pakiet złożony z 26 warstw tkanin co oznacza, że tak konstruowany hybrydowy układ warstw w pakiecie balistycznym może ograniczyć masę powierzchniową pakietu balistycznego i tym samym masę kamizelki kuloodpornej.

8. LITERATURA

1. Witczak E. Tekstylne wyroby balistyczne. Monografia pod redakcją Elżbiety Witczak (MORATEX), ed. 1, Łódź, Piktora (2011).
2. Stempień Z. Strukturalna barierowość balistyczna tekstyliów. Zeszyt Naukowy 1049. Łódź, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej (2009).
3. Abteu, M. A., Boussu, F. & Bruniaux, P. Dynamic impact protective body armour: A comprehensive appraisal on panel engineering design and its prospective materials. *Def. Technol.* 17, 2027–2049 (2021).
4. Zeglen C. Bullet-Proof Fabric, patent USA nr 577,999 wydany 2.03.1897r.
5. Kwolek S. US Patent No. 3,819,587. Wholly aromatic carbocyclic polycarbonamide fiber having orientation angle of less than about 45° (1974).
6. Yang HH. Kevlar aramid fiber. New York, John Wiley (1992).
7. Niels A. Abt, Schneider-Storrer W. European Patent No. EP1924299B1. Ultra high molecular weight polyethylene articles and methods of forming ultra high molecular weight polyethylene articles (2000).
8. Yadav, R., Naebe, M., Wang, X. & Kandasubramanian, B. Body armour materials: from steel to contemporary biomimetic systems. *RSC Adv.* 6, 115145–115174 (2016).
9. Chatzi, E. G. & Koenig, J. L. Morphology and structure of kevlar fibers: A review. *Polym. Plast. Technol. Eng.* 26, 229–270 (1987).
10. Li, L. S., Allard, L. F. & Bigelow, W. C. On the morphology of aromatic polyamide fibers (Kevlar, Kevlar-49, and PRD-49). *J. Macromol. Sci. Part B* 22, 269–290 (1983).
11. Rebouillat, S., Peng, J. C. M. & Donnet, J. B. Surface structure of Kevlar® fiber studied by atomic force microscopy and inverse gas chromatography. *Polymer (Guildf)*. 40, 7341–7350 (1999).
12. Tam, T. & Bhatnagar, A. High-performance ballistic fibers and tapes. *Light. Ballist. Compos. Mil. Law-Enforcement Appl. Second Ed.* 1–39 (2016).
13. Chen, X. & Zhou, Y. Technical textiles for ballistic protection. *Handb. Tech. Text. Tech. Text. Appl.* 169–192 (2016).
14. Vijayan, K. Effect of Environmental Exposures on the Aramid Fibre Kevlar. *Met. Mater. Process.* 12, 259–268 (2000).
15. Kelly, J. M. Ultra-high molecular weight polyethylene. *J. Macromol. Sci. - Polym. Rev.* 42, 355–371 (2002).
16. Anton, C., Mackley, M. R. & Solbai, S. B. Extrusion processing of ultra-high molecular weight polyethylene; a new method for the production of high performance structures. *Polym. Bull.* 17, 175–179 (1987).

17. Penning, J. P., Dijkstra, D. J. & Pennings, A. J. Tensile force at break of gel-spun/hot-drawn ultrahigh molecular weight polyethylene fibres. *J. Mater. Sci.* 26, 4721–4726 (1991).
18. Hashimoto, T., Murase, H. & Ohta, Y. A new scenario of flow-induced shish-kebab formation in entangled polymer solutions. *Macromolecules* 43, 6542–6548 (2010).
19. Ohta, Y., Murase, H. & Hashimoto, T. Structural development of ultra-high strength polyethylene fibers: Transformation from kebabs to shishes through hot-drawing process of gel-spun fibers. *J. Polym. Sci. Part B Polym. Phys.* 48, 1861–1872 (2010).
20. Kuo, H. C. & Jeng, M. C. Effects of part geometry and injection molding conditions on the tensile properties of ultra-high molecular weight polyethylene polymer. *Mater. Des.* 31, 884–893 (2010).
21. Fisch, A. G. *et al.* Direct production of ultra-high molecular weight polyethylene with oriented crystalline microstructures. *J. Mol. Catal. A Chem.* 366, 74–83 (2013).
22. Penning, J. P., van der Werff, H., Roukema, M. & Pennings, A. J. On the theoretical strength of gelspun/hotdrawn ultra-high molecular weight polyethylene fibres. *Polym. Bull.* 23, 347–352 (1990).
23. Ohta, Y., Murase, H. & Hashimoto, T. Effects of spinning conditions on the mechanical properties of ultrahigh-molecular-weight polyethylene fibers. *Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics* vol. 43 2639–2652 (2005).
24. Schwartz, P., Netravali, A. & Sembach, S. Effects of Strain Rate and Gauge Length on the Failure of Ultra-High Strength Polyethylene Fibers. *Text. Res. J.* 56, 502–508 (1986).
25. Wang, J. & Smith, K. J. The breaking strength of ultra-high molecular weight polyethylene fibers. *Polymer (Guildf)*. 40, 7261–7274 (1999).
26. Languerand, D. L., Zhang, H., Murthy, N. S., Ramesh, K. T. & Sansoz, F. Inelastic behavior and fracture of high modulus polymeric fiber bundles at high strain-rates. *Mater. Sci. Eng. A* 500, 216–224 (2009).
27. Cohen, Y., Rein, D. M. & Vaykhansky, L. A novel composite based on ultra-high-molecular-weight polyethylene. *Compos. Sci. Technol.* 57, 1149–1154 (1997).
28. Hudspeth, M., Nie, X. & Chen, W. Dynamic failure of Dyneema SK76 single fibers under biaxial shear/tension. *Polymer (Guildf)*. 53, 5568–5574 (2012).
29. Jauffrès, D., Lame, O., Vigier, G. & Doré, F. Microstructural origin of physical and mechanical properties of ultra high molecular weight polyethylene processed by high velocity compaction. *Polymer (Guildf)*. 48, 6374–6383 (2007).
30. Liu, X. & Yu, W. Evaluation of the tensile properties and thermal stability of ultrahigh-molecular-weight polyethylene fibers. *J. Appl. Polym. Sci.* 97, 310–315 (2005).
31. Afshari, M., Sikkema, D. J., Lee, K. & Bogle, M. High performance fibers based on rigid and flexible polymers. *Polymer Reviews* vol. 48 230–274 (2008).

32. Kuroki, T., Tanaka, Y., Hokudoh, T. & Yabuki, K. Heat resistance properties of poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole) fiber. *J. Appl. Polym. Sci.* 65, 1031–1036 (1997).
33. Bourbigot, S., Flambard, X. & Poutch, F. Study of the thermal degradation of high performance fibres - Application to polybenzazole and p-aramid fibres. *Polym. Degrad. Stab.* 74, 283–290 (2001).
34. Forster, A. L. *et al.* Hydrolytic stability of polybenzobisoxazole and polyterephthalamide body armor. *Polym. Degrad. Stab.* 96, 247–254 (2011).
35. Chin, J. *et al.* Temperature and humidity aging of poly(p-phenylene-2,6-benzobisoxazole) fibers: Chemical and physical characterization. *Polym. Degrad. Stab.* 92, 1234–1246 (2007).
36. Song, B., Zhuang, Q., Ying, L., Liu, X. & Han, Z. Photostabilisation of poly(p-phenylenebenzobisoxazole) fibre. *Polym. Degrad. Stab.* 97, 1569–1576 (2012).
37. Wang, H. & Liu, J. P. Enhanced UV photo-stabilization of PBO fibers via sol-gel surface modification. *Adv. Mater. Res.* 773, 477–481 (2013).
38. Smith, J. C., Mccrackin, F. L. & Schiefer, H. F. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading:Part III. Effect of Wave Propagation. *Text. Res. J.* 25, 701–708 (1955).
39. Smith, J. C., Mccrackin, F. L., Schiefer, H. F., Stone, W. K. & Towne, K. M. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading:Part IV: Transverse Impact Tests. *Text. Res. J.* 26, 821–828 (1956).
40. Smith, J. C., Mccrackin, F. L. & Schiefer, H. F. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading:Part V: Wave Propagation in Long Textile Yarns Impacted Transversely. *Text. Res. J.* 28, 288–302 (1958).
41. Smith, J. C., Blandford, J. M. & Schiefer, H. F. Stress-Strain Relationships. in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part VI: Velocities of Strain Waves Resulting from Impact. *Text. Res. J.* 30, 752–760 (1960).
42. Smith, J. C., Shouse, P. J., Blandford, J. M. & Towne, K. M. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading:Part VII: Stress-Strain Curves and Breaking-Energy Data for Textile Yarns. *Text. Res. J.* 31, 721–734 (1961).
43. Smith, J. C., Blandford, J. M. & Towne, K. M. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part VIII: Shock Waves, Limiting Breaking Velocities, and Critical Velocities. *Text. Res. J.* 32, 67–76 (1962).
44. Smith, J. C., Blandford, J. M., Shouse, P. J. & Towne, K. M. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part IX: Effect of Yarn Structure. *Text. Res. J.* 32, 472–480 (1962).

45. Smith, J. C., Fenstermaker, C. A. & Shouse, P. J. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part X: Stress-Strain Curves Obtained by Impacts with Rifle Bullets. *Text. Res. J.* 33, 919–934 (1963).
46. Smith, J. C., Fenstermaker, C. A. & Shouse, P. J. Stress-Strain Relationships in Yarns Subjected to Rapid Impact Loading: Part XI: Strain Distributions Resulting from Rifle Bullet Impact. *Text. Res. J.* 35, 743–757 (1965).
47. Cheeseman, B. A. & Bogetti, T. A. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Compos. Struct.* 61, 161–173 (2003).
48. Carr, D. J. Failure mechanisms of yarns subjected to ballistic impact. *J. Mater. Sci. Lett.* 18, 585–588 (1999).
49. Cunniff, P. M. An Analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact. *Text. Res. J.* 62, 495–509 (1992).
50. Ha-Minh, C., Kanit, T., Boussu, F. & Imad, A. Numerical multi-scale modeling for textile woven fabric against ballistic impact. *Comput. Mater. Sci.* 50, 2172–2184 (2011).
51. Handbook ballistic materials, Teijin Aramid, <https://www.teijinaramid.com/wp-content/uploads/2018/10/Teijin-Aramid-Ballistic-handbook.pdf>, plik pobrany w roku 2022
52. Nilakantan, G. & Gillespie, J. W. Ballistic impact modeling of woven fabrics considering yarn strength, friction, projectile impact location, and fabric boundary condition effects. *Compos. Struct.* 94, 3624–3634 (2012).
53. Yang, D. Design , Performance and Fit of Fabrics for Female Body Armour. Ph.D Thesis, University of Manchester (2011).
54. Roylance, D. Wave propagation in a viscoelastic fiber subjected to transverse impact. *J. Appl. Mech. Trans. ASME* 40, 143–148 (1973).
55. Roylance, D. Ballistics of transversely impacted fibers. *Text. Res. J.* 47, 679–684 (1977).
56. Yang, C. C., Ngo, T. & Tran, P. Influences of weaving architectures on the impact resistance of multi-layer fabrics. *Mater. Des.* 85, 282–295 (2015).
57. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T. A. & Cheeseman, B. A. Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric. *Int. J. Impact Eng.* 31, 996–1012 (2005).
58. Laible, R. C. Ballistic materials and penetration mechanics. *Am. J. Forensic Med. Pathol.* 3, 190 (1982).
59. Roylance, D. & Wang, S. S. Penetration mechanics of textile structures. in 273–292 (1980).
60. Sadegh, A. M. & Cavallaro, P. V. Mechanics of energy absorbability in plain-woven fabrics: An analytical approach. *J. Eng. Fiber. Fabr.* 7, 10–25 (2012).

61. Srivastava, A., Majumdar, A. & Butola, B. S. Improving the impact resistance performance of Kevlar fabrics using silica based shear thickening fluid. *Mater. Sci. Eng. A* 529, 224–229 (2011).
62. Prosser, R. A., Cohen, S. H. & Segars, R. A. Heat as a Factor in the Penetration of Cloth Ballistic Panels by 0.22 Caliber Projectiles. *Text. Res. J.* 70, 709–722 (2000).
63. Tabiei, A. & Nilakantan, G. Ballistic impact of dry woven fabric composites: A review. *Applied Mechanics Reviews* vol. 61 0108011–01080113 (2008).
64. Hasanzadeh, M. & Mottaghitlab, V. The role of shear-thickening fluids (STFs) in ballistic and stab-resistance improvement of flexible armor. *J. Mater. Eng. Perform.* 23, 1182–1196 (2014).
65. Tan, V. B. C., Shim, V. P. W. & Zeng, X. Modelling crimp in woven fabrics subjected to ballistic impact. *Int. J. Impact Eng.* 32, 561–574 (2005).
66. Abteu, M. A., Boussu, F., Bruniaux, P., Loghin, C. & Cristian, I. Ballistic impact mechanisms – A review on textiles and fibre-reinforced composites impact responses. *Compos. Struct.* 223, 110966 (2019).
67. Rao, Y. & Farris, R. J. Modeling and experimental study of the influence of twist on the mechanical properties of high-performance fiber yarns. *J. Appl. Polym. Sci.* 77, 1938–1949 (2000).
68. Yang HH. Kevlar aramid fiber. New York: John Wiley, (1992).
69. Stein, W. Construction and action of bullet resistant vests. *Melliand Textile* 62(6), 595-602 (1981).
70. Nilakantan, G. Filament-level modeling of Kevlar KM2 yarns for ballistic impact studies. *Compos. Struct.* 104, 1–13 (2013).
71. Duan, Y., Keefe, M., Bogetti, T. A. & Cheeseman, B. A. Modeling friction effects on the ballistic impact behavior of a single-ply high-strength fabric. *Int. J. Impact Eng.* 31, 996–1012 (2005).
72. Ha-Minh, C., Imad, A., Kanit, T. & Boussu, F. Numerical analysis of a ballistic impact on textile fabric. *Int. J. Mech. Sci.* 69, 32–39 (2013).
73. Nilakantan, G., Keefe, M., Bogetti, T. A., Adkinson, R. & Gillespie, J. W. On the finite element analysis of woven fabric impact using multiscale modeling techniques. *Int. J. Solids Struct.* 47, 2300–2315 (2010).
74. Chu, C. K. & Chen, Y. L. Ballistic-proof effects of various woven constructions. *Fibres Text. East. Eur.* 83, 63–67 (2010).
75. Yang, C. C., Ngo, T. & Tran, P. Influences of weaving architectures on the impact resistance of multi-layer fabrics. *Mater. Des.* 85, 282–295 (2015).
76. Zhou, Y. & Chen, X. A numerical investigation into the influence of fabric construction on ballistic performance. *Compos. Part B Eng.* 76, 209–217 (2015).

77. Wang, Y., Chen, X., Young, R., Kinloch, I. & Wells, G. A numerical study of ply orientation on ballistic impact resistance of multi-ply fabric panels. *Compos. Part B Eng.* 68, 259–265 (2015).
78. Nilakantan, G. & Nutt, S. Effects of ply orientation and material on the ballistic impact behavior of multilayer plain-weave aramid fabric targets. *Def. Technol.* 14, 165–178 (2018).
79. Li, H., Zhang, R., Min, S., Zhou, Y. & Sun, J. Parametric study on the ballistic performance of seamed woven fabrics. *Def. Technol.* (2022). doi:10.1016/j.dt.2022.03.004.
80. Ha-Minh, C., Boussu, F., Kanit, T., Crépin, D. & Imad, A. Analysis on failure mechanisms of an interlock woven fabric under ballistic impact. *Eng. Fail. Anal.* 18, 2179–2187 (2011).
81. Wei, Q., Yang, D., Gu, B. & Sun, B. Numerical and experimental investigation on 3D angle interlock woven fabric under ballistic impact. *Compos. Struct.* 266, (2021).
82. Russell, B. P., Karthikeyan, K., Deshpande, V. S. & Fleck, N. A. The high strain rate response of Ultra High Molecular-weight Polyethylene: From fibre to laminate. *Int. J. Impact Eng.* 60, 1–9 (2013).
83. Mishra, V. D., Mishra, A., Singh, A., Verma, L. & Rajesh, G. Ballistic impact performance of UHMWP fabric impregnated with shear thickening fluid nanocomposite. *Compos. Struct.* 281, (2022).
84. Wiśniewski, A. & Pacek, D. Experimental research and numerical analysis of 9 mm Parabellum projectile penetration of ultra-high molecular weight polyethylene layers. *Probl. Tech. Uzbroy. R.* 42, z. 127, (2013).
85. Ahmad, M. R., Hassim, N., Ahmad, W. Y. W., Samsuri, A. & Yahya, M. H. M. Preliminary Investigation on the ballistic limit of ultra high molecular weight polyethylene unidirectional coated fabric system. *Fibres Text. East. Eur.* 99, 89–94 (2013).
86. Harle J.W.S., Leech C.M., Adeyefa A., Cork C.R. Ballistic Impact Resistance of Multi-Layer Textile Fabrics, University of Manchester Institute of Science and Technology, Contract No. DAJA37-79-C-0532 (1981).
87. El Messiry, M. Investigation of puncture behaviour of flexible silk fabric composites for soft body armour. *Fibres Text. East. Eur.* 22, 71–76 (2014).
88. El Messiry, M. & Eltahan, E. Stab resistance of triaxial woven fabrics for soft body armor. *J. Ind. Text.* 45, 1062–1082 (2016).
89. Pinkos, J. & Stempien, Z. Numerical and Experimental Comparative Analysis of Ballistic Performance of Packages Made of Biaxial and Triaxial Kevlar 29 Fabrics. *Autex Res. J.* 20, 203–219 (2020).
90. Pinkos J., *Modelowanie wielowarstwowych osłon balistycznych minimalizujących skutki udaru*, Zeszyt Naukowy Łódź (2018).

91. Pinkos, J., Stempien, Z. & Smędra, A. Experimental analysis of ballistic trauma in a human body protected with 30 layer packages made of biaxial and triaxial Kevlar® 29 fabrics. *Def. Technol.* (2022).
92. Yang, Y. & Chen, X. Investigation of failure modes and influence on ballistic performance of Ultra-High Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) uni-directional laminate for hybrid design. *Compos. Struct.* 174, 233–243 (2017).
93. Yang, Y. & Chen, X. Investigation on energy absorption efficiency of each layer in ballistic armour panel for applications in hybrid design. *Compos. Struct.* 164, 1–9 (2017).
94. Chen, X., Zhou, Y. & Wells, G. Numerical and experimental investigations into ballistic performance of hybrid fabric panels. *Compos. Part B Eng.* 58, 35–42 (2014).
95. Yang, Y., Ling, T., Liu, Y. & Xue, S. Synergistic effect of hybrid ballistic soft armour panels. *Compos. Struct.* 272, (2021).
96. Ingle, S., Yerramalli, C. S., Guha, A. & Mishra, S. Numerical investigation on hybridization of woven fabric armour to enhance ballistic protection. *Mech. Mater.* 170, (2022).
97. Kedzierski, P., Gieleta, R., Morka, A., Niezgodna, T. & Surma, Z. Experimental study of hybrid soft ballistic structures. *Compos. Struct.* 153, 204–211 (2016).
98. Karahan, M., Kuş, A. & Eren, R. An investigation into ballistic performance and energy absorption capabilities of woven aramid fabrics. *Int. J. Impact Eng.* 35, 499–510 (2008).
99. Ahmad, M. R., Ahmad, W. Y. W., Salleh, J. & Samsuri, A. Effect of fabric stitching on ballistic impact resistance of natural rubber coated fabric systems. *Mater. Des.* 29, 1353–1358 (2008).
100. Barauskas, R. & Abraitienė, A. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA. *Int. J. Impact Eng.* 34, 1286–1305 (2007).
101. Gogineni, S., Gao, X. L., David, N. V. & Zheng, J. Q. Ballistic impact of Twaron CT709® plain weave fabrics. *Mech. Adv. Mater. Struct.* 19, 441–452 (2012).
102. Hallquist, J. O., LS-DYNA Keyword User's Manual, Vol. I and II, Livermore Software Technology Corporation (2020).
103. Rao, M. P., Duan, Y., Keefe, M., Powers, B. M. & Bogetti, T. A. Modeling the effects of yarn material properties and friction on the ballistic impact of a plain-weave fabric. *Compos. Struct.* 89, 556–566 (2009).
104. Das, S., Jagan, S., Shaw, A. & Pal, A. Determination of inter-yarn friction and its effect on ballistic response of para-aramid woven fabric under low velocity impact. *Compos. Struct.* 120, 129–140 (2015).
105. Department of Justice, U., of Justice Programs, O. & Institute of Justice, N. Ballistic resistance of body armor NIJ standard-0101.06. Body Armor Ballist. Stab Resist. Stand. with a Guid. to Sel. 1–62 (2012).

106. Zeng, X.S., Shim, V.P.W. and Tan, V.B.C. (2005) 'Influence of boundary conditions on the ballistic performance of high-strength fabric targets', *International Journal of Impact Engineering*, 32(1–4), pp. 631–642.
107. Nilakantan, G. and Nutt, S. (2014) 'Effects of fabric target shape and size on the V50 ballistic impact response of soft body armor', *Composite Structures*, 116(1), pp. 661–669.
108. Singletary, J., Steinruck, T. and Fitzgerald P. (2007) 'Effects of boundary conditions on v50 and zone of mixed results of fabric armor targets', 23rd International Symposium on Ballistics, Tarragona, Spain 16-20 April 2007.
109. Roylance, D., Hammas, P., Ting, J., Chi, H. & Scott, B. Numerical modeling of fabric impact. *Am. Soc. Mech. Eng. Aerosp. Div. AD 48*, 155–160 (1995).
110. Stempien, Z. Influence of a Woven Fabric Structure on the Propagation Velocity of a Tension Wave. *FIBRES Text. East. Eur.* 15, 64–65 (2007).