

Małgorzata Kudlińska¹
ORCID: 0000-0001-9030-4531
Marek Klich²
ORCID: 0000-0002-2840-2920
Stefan Cichosz³
ORCID: 0000-0003-3076-7766
Mateusz Stecki⁴
ORCID: 0009-0009-2803-3385

Katarzyna Karolak-Romaniuk⁵
ORCID: n/d
Natalia Czyżnik⁶
ORCID: 0009-0002-9855-9664
Sylvia Kotarba⁷
ORCID: 0000-0003-1490-0627
Marzena Fejdys⁸
ORCID: 0000-0002-2672-4176

Nowoczesne rozwiązania w projektowaniu ochraniaczy przedramienia przeznaczonych do wykonywania działań w warunkach zamieszek



Źródło: archiwum Autora

Streszczenie: W pracy przedstawiono założenia techniczno-konstrukcyjne nowej generacji elementu zestawu przeciwwuderzeniowego w postaci ochraniacza przedramienia, przeznaczonego dla funkcjonariuszy oddziałów prewencji Policji. Głównym celem wykonanych badań było zwiększenie poziomu ochrony osobistej, komfortu użytkowników oraz wprowadzenie nowych funkcjonalności umożliwiających lepsze dostosowanie wyposażenia do różnorodnych zadań operacyjnych. Szczególną uwagę poświęcono również redukcji masy elementów zestawu — w wyniku przeprowadzonych badań udało się zmniejszyć ciężar wyposażenia o około 15%, co przyczynia się do ograniczenia obciążenia fizycznego funkcjonariuszy podczas działań operacyjnych. W ramach badań opracowano modele technologiczne ochraniaczy przedramienia, które poddano szczegółowej ocenie pod kątem ergonomii, funkcjonalności oraz możliwości adaptacji do specyfiki realizowanych zadań. Analiza wyników wykazała istotną poprawę parametrów ochronnych oraz kompatybilności z innymi elementami wyposażenia, co może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności działań. Opracowany element zestawu przeciwwuderzeniowego stanowi podstawę do dalszych prac wdrożeniowych i przygotowania produkcji komponentów gotowych do użytkowania w środowiskach o podwyższonym zagrożeniu zdrowia i życia. Całość prac pozwoliła na stworzenie nowoczesnego środka ochrony indywidualnej, łączącego funkcjonalność, ergonomię, adaptacyjność i zmniejszoną masę, co może przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności działań służb mundurowych.

Słowa kluczowe: ochraniacz przedramienia, zamieszki, funkcjonariusze Policji, oddziały prewencji

Abstract: This paper presents the technical and design specifications for a new generation of anti-impact kit component in the form of a forearm protector, intended for officers of the Police Prevention Units. The main objective of the research was to increase the level of personal protection and user comfort, and to introduce new functionalities enabling better adaptation of the equipment to a variety of operational tasks. Particular attention was also paid to reducing the weight of the kit components — as a result of the research, the weight of the equipment was reduced by approximately 15%, which helps to reduce the physical strain on officers during operational activities. As part of the research, technological models of forearm protectors were developed and subjected to a detailed assessment in terms of ergonomics, functionality and adaptability to the specific nature of the tasks performed. Analysis of the results showed a significant improvement in protective parameters and compatibility with other items of equipment, which may contribute to increased safety and operational effectiveness. The impact protection kit component developed forms the basis for further implementation work and the preparation of production of components ready for use in environments where there is an increased risk to health and life. The work as a whole has resulted in the creation of modern personal protective equipment that combines functionality, ergonomics, adaptability and reduced weight, which may contribute to enhancing the safety and effectiveness of uniformed services' operations.

Keywords: forearm protector, riots, police officers, riot police

Informacja

Badania wykonane w ramach realizacji projektu pt. „Indywidualizacja procesu projektowania zaawansowanych środków ochrony indywidualnej — nowej generacji zestawu przeciwwuderzeniowego oraz elementów umundurowania oddziałów Policji

działających w obszarach o wysokim stopniu zagrożenia zdrowia i życia” (nr umowy: PP-16/2023/PW-PN), realizowanego w ramach Programu wieloletniego pn. Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy — VI etap, okres realizacji: lata 2023–2025, część B — w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych finansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju przy współpracy z Centralnym Instytutem Ochrony Pracy — Państwowym Instytutem Badawczym.

¹ Małgorzata Kudlińska, inż., zastępca kierownika Zakładu Projektowego ds. konfekcji technicznej w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”. Obszar zainteresowań naukowych: inżynieria materiałowa, włókiennictwo. Adres do korespondencji: <mkudlinska@moratex.eu>.

² Marek Klich, mgr inż., asystent w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”. Obszar zainteresowań naukowych: inżynieria materiałowa, inżynieria mechaniczna. Adres do korespondencji: <mklich@moratex.eu>.

³ Stefan Cichosz, dr inż., asystent w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”. Obszar zainteresowań naukowych: inżynieria materiałowa, polimery, włókna celulozy, kompozyty polimerowe. Adres do korespondencji: <scichosz@moratex.eu>.

⁴ Mateusz Stecki, mgr inż. Obszar zainteresowań naukowych: energetyka jądrowa, inżynieria jądrowa, dozymetria. Adres do korespondencji: <matstecki@gmail.com>.

⁵ Katarzyna Karolak-Romaniuk, specjalista inżynierijno-techniczny w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”. Obszar zainteresowań naukowych: wzornictwo, projektowanie i konstrukcja odzieży. Adres do korespondencji: <kromaniuk@moratex.eu>.

⁶ Natalia Czyżnik, mgr inż. specjalista badawczo-techniczny w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”. Obszar zainteresowań naukowych: inteligentne tekstylia, odzież ochronna. Adres do korespondencji: <nczyznik@moratex.eu>.

⁷ Sylvia Kotarba, dr inż., asystent w Instytucie Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”. Obszar zainteresowań naukowych: wykorzystanie sztucznej inteligencji (AI), mieszanej (MR) i wirtualnej rzeczywistości (VR) w ochronie życia i zdrowia; zastosowania technologii CAD oraz inżynierii odwrotnej w modelowaniu 3D. Adres do korespondencji: <skotarba@moratex.eu>.

⁸ Marzena Fejdys, dr hab. inż., prof. Instytutu Technologii Bezpieczeństwa „Moratex”, zastępca dyrektora ds. Naukowych tego instytutu. Obszar zainteresowań naukowych: inżynieria materiałowa, kompozyty polimerowe. Adres do korespondencji: <mfejdys@moratex.eu>.

1. Wstęp

Współczesne działania funkcjonariuszy Policji oddziałów prewencji charakteryzują się wysokim ryzykiem i dużą zmiennością sytuacyjną, co wymaga stosowania zaawansowanych środków ochrony osobistej o wysokich parametrach użytkowych⁹. Wyposażenie ochronne, takie jak zestawy przeciwuderzeniowe czy umundurowanie ochronne, stanowi kluczowy element zapewniający bezpieczeństwo i efektywność w działaniach operacyjnych¹⁰. Pomimo postępu w technologii materiałów i ergonomii, wciąż występują problemy związane z nadmierną masą, ograniczoną elastycznością oraz niedostatecznym dopasowaniem do indywidualnych potrzeb użytkowników¹¹. Skutkuje to obniżeniem komfortu, zwiększonym zmęczeniem i ograniczeniem mobilności, co negatywnie wpływa na skuteczność działań interwencyjnych¹².

W ramach przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych opracowano nową generację wyrobów ochronnych o podwyższonych parametrach funkcjonalnych, ergonomicznych i użytkowych. Zastosowano modułowy proces projektowania zindywidualizowanego, oparty na analizie ryzyka, kryterialnym doborze materiałów oraz konstrukcyjnym dostosowaniu elementów ochronnych do specyfiki działań oddziałów prewencji. Podejście to umożliwiło odejście od koncepcji uniwersalnego wyposażenia na rzecz inteligentnego systemu projektowania opartego na danych empirycznych i analizach funkcjonalnych.

Jednym z kluczowych osiągnięć badań było zoptymalizowanie relacji między poziomem ochrony, a masą i sztywnością zestawu przeciwuderzeniowego¹³. Opracowane rozwiązania materiałowe i konstrukcyjne — w tym wykorzystanie struktur polimerowych¹⁴ o odpowiednich właściwościach mechanicznych¹⁵ — pozwoliły znacząco zredukować masę przy jednoczesnym zachowaniu lub zwiększeniu odporności mechanicznej¹⁶.

W ramach walidacji zastosowano kryteria zgodne z wymaganiami BS 7971:2014 *Protective equipment for use in violent situations and in training*¹⁷, obejmującej m.in. odporność

na uderzenia¹⁸, ergonomię¹⁹, właściwości biomechaniczne²⁰, powierzchnię ochrony oraz trwałość eksploatacyjną elementów ochronnych²¹.

Wyniki prac obejmują opracowanie założeń techniczno-konstrukcyjnych i specyfikacji technicznych zgodnych zarówno z wymaganiami ustawy o systemie oceny zgodności wyrobów przeznaczonych na potrzeby bezpieczeństwa państwa oraz z kryteriami normy BS 7971:2014. Pozwala to na pełną standaryzację parametrów użytkowych i jakościowych nowej generacji zestawów przeciwuderzeniowych.

Uzyskane rezultaty potwierdzają, że zastosowanie podejścia modułowego i indywidualizowanego w projektowaniu wyposażenia ochronnego, w połączeniu z walidacją zgodną z międzynarodowymi normami, znacząco zwiększa bezpieczeństwo, komfort i mobilność funkcjonariuszy. Opracowane rozwiązania wpisują się w kierunek rozwoju inteligentnych, adaptacyjnych systemów ochrony osobistej, stanowiących istotny etap w unowocześnianiu technologii bezpieczeństwa publicznego.

2. Założenia funkcjonalno-użytkowe

Projektowany ochraniacz przedramienia powinien charakteryzować się wysokim poziomem skuteczności ochronnej oraz ergonomiczną użytkowaniem. W szczególności musi on spełniać wymagania 2. poziomu ochrony w zakresie odporności na uderzenia, zgodnie z normą BS 7971:2014 *Protective equipment for use in violent situations and in training*, co gwarantuje odpowiedni stopień bezpieczeństwa w trakcie użytkowania w warunkach narażenia na urazy mechaniczne.

Konstrukcja ochraniacza powinna być zaprojektowana w taki sposób, aby jego poszczególne elementy idealnie dopasowywały się do anatomii ręki użytkownika, zapewniając nie tylko skuteczną ochronę, ale także komfort noszenia nawet podczas długotrwałego użytkowania. Ergonomiczny kształt oraz odpowiedni dobór materiałów mają na celu zminimalizowanie ograniczeń ruchowych i zwiększenie swobody działania²².

Dodatkowo ochraniacz powinien być wyposażony w stabilny i bezpieczny system mocowania, który umożliwi pewne utrzymanie go na przedramieniu w każdych warunkach. Mechanizmy mocujące muszą gwarantować łatwość zakładania i zdejmowania, a jednocześnie zapobiegać przypadkowemu przesuwaniu się lub zsuwaniu elementów ochronnych w trakcie użytkowania²³.

⁹ G. den Heyer, *Ghosts of Policing Strategies Past: Is the New Zealand Police 'Prevention First' Strategy Historic, Contemporary or the Future?*, 'Public Organization Review' 2016, nr 16, s. 529–548.

¹⁰ P.C. Dempsey, P.J. Hancock, N.J. Rehrer, *Impact of police body armor and equipment on mobility*, 'Applied Ergonomics' 2013, nr 44, s. 957–961.

¹¹ B.R. Jewett i in., *The effects of equipment carriage on functional movement quality among law enforcement officers*, 'Ergonomics' 2023, nr 66, s. 2277–2287.

¹² K. Gijssbertse, *The effects of mass, bulk and stiffness of personal protective equipment and clothing on physical performance when performing a military mobility obstacle course*, 'Applied Ergonomics' 2021, nr 95, s. 103448–103457.

¹³ E.F. Marins i in., *Exploring police ergonomics: Effects of personal protective equipment, holster position and perceived discomfort on different gait intensities*, 'Applied Ergonomics' 2025, nr 125, s. 104441–104449.

¹⁴ D. Pieniak i in., *Influence of Thermal Shocks on Residual Static Strength, Impact Strength and Elasticity of Polymer-Composite Materials Used in Firefighting Helmets*, 'Materials' 2022, nr 15, s. 57–78.

¹⁵ S. Li i in., *Numerical simulation and experimental research of low energy impact on police riot suit*, 'Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science' 2023, nr 23, s. 18–28.

¹⁶ S. Hudson i in., *'We just make do': the use, comfort and functionality of personal protective equipment in the UK mounted police*, 'Ergonomics' 2025, nr 68, s. 1–12.

¹⁷ British Standards Institution, *BS 7971-10:2014 — Protective clothing and equipment for use in violent situations and in training. Coveralls. Requirements and test methods*, London 2014.

¹⁸ K.H. Wozniak, K.M. Drakulich, B.R. Calfano, *Public Opinion About Police Weapons and Equipment: An Exploratory Analysis*, 'Criminal Justice Policy Review' 2021, nr 32, s. 960–991.

¹⁹ M.C. Locatelli, *Low back pain in military police activity: analysis of prevalence, associated factors, and ergonomics*, 'Revista Brasileira de Medicina do Trabalho' 2021, nr 19, s. 482–490.

²⁰ S. Hudson i in., *The comfort and functional performance of personal protective equipment for police officers: a systematic scoping review*, 'Ergonomics' 2024, nr 67, s. 1317–1337.

²¹ L. Madej-Kielbik i in., *Effect of Accelerated Ageing on the Mechanical and Structural Properties of the Material System Used in Protectors*, 'Polymers' 2019, nr 11, s. 1263–1275.

²² M.S. Parmar, N. Kapil, N. Sisodia, *Development of a Unique Stab and Impact Resistant Material for Anti-riot Body Protector* [w:] A. Majumdar, D. Gupta, S. Gupta (red.), *Functional Textiles and Clothing*, Singapur 2020.

²³ D.B. Sitotaw i in., *A Review on the Performance and Comfort of Stab Protection Armor*, 'Autex Research Journal' 2022, nr 22, s. 96–107.

3. Badania

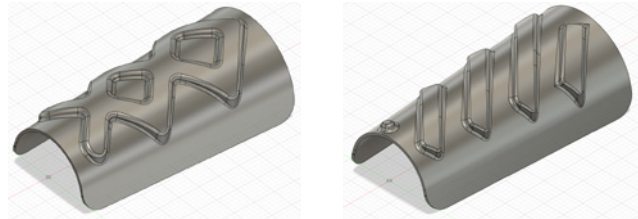
3.1. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne rozpoczęto od przeprowadzenia analizy wymagań określonych w metodyce badawczej normy BS 7971:2002 określającej poziomy ochrony użytkownika. Aparatura badawcza składała się z kowadła, wymiennego bijaka, szyn prowadzących oraz balastu dociążającego bijak. Wykonanie symulacji metodą elementów skończonych wymagało zdefiniowania odpowiednich warunków brzegowych oraz opracowania możliwie prostego modelu geometrycznego, zachowującego istotne cechy fizyczne zjawiska. W trakcie rzeczywistego badania bijak opada pionowo na ochroniacz, osiągając energię 5 J lub 15 J w zależności od masy i wysokości spadku. Ponieważ tor ruchu bijaka służy jedynie nadaniu energii kinetycznej, w symulacji pominięto ruch związany z opadaniem — przyjęto, że w momencie kontaktu bijak posiada prędkość odpowiadającą zadanej energii. Dla uproszczenia, ruch bijaka opisano jako jednostajny prostoliniowy, co pozwoliło ograniczyć czas obliczeń bez utraty dokładności. Symulowano wyłącznie moment pierwszego uderzenia, dlatego nie ograniczono jego ruchu po kolizji i uproszczono model o prowadnice i wózek bijaka oraz inne zjawiska fizyczne z tym związane jako niewpływające na wynik badania.

Pierwotna konfiguracja zgodna z normą wykazała jednak pewne ograniczenia wpływające na wiarygodność wyników. Podłużne powierzchnie bijaka i kowadła powodowały wzdłużny rozkład energii, przez co wpływ przetłoczeń materiału był zredukowany, a niewielkie przesunięcie osłony względem osi bijaka znacznie zmieniało charakter odkształceń. Dodatkowo niewielkie wymiary kowadła prowadziły do lokalnego badania wytrzymałości, uniemożliwiając ocenę zachowania całej osłony.

W celu poprawy odwzorowania rzeczywistego uderzenia wprowadzono modyfikacje modelu — bijak zastąpiono kulą o średnicy 10 cm, co pozwoliło uzyskać punktowy charakter uderzenia i równomierne rozchodzenie się fali uderzeniowej. Dzięki symetrii kuli bijak zachowywał stabilne położenie po kolizji, a kierunek jego odbicia wskazywał największe naprężenia w osłonie. Zastosowano również sposób podparcia, odbierając wszystkie stopnie swobody dla krawędzi osłony, co zapewniło jej stabilność i umożliwiło analizę ugięć. Czas trwania symulacji skrócono z 0,5 s do 0,2 s, obejmując wyłącznie zjawisko uderzenia i odbicia bijaka.

Do analizy w programie ANSYS opracowano trzy modele ochroniaczy: dwa badawcze (rysunek 1) oraz jeden kontrolny odpowiadający obecnie stosowanym osłonom (rysunek 2). Modele zaprojektowano w Autodesk Fusion 360 z zachowaniem stałej grubości ścianki. Warianty badawcze różniły się układem przetłoczeń. Model kontrolny przygotowano na podstawie skanu 3D istniejącej osłony (o przetłoczeniach poprzecznych) stosowanej przez policję. Przed implementacją w ANSYS, w module SpaceClaim wprowadzono uproszczenia geometryczne polegające na usunięciu zaokrągleń oraz zwężenia w kierunku nadgarstka, co zmniejszyło złożoność modelu bez istotnego wpływu na jego wytrzymałość. Tworzenie siatki wykonano w module Mechanical, uzyskując regularną tetragonalną siatkę o współczynniku wzrostu nieprzekraczającym 1,2, co zapewniło kompromis między dokładnością a czasem obliczeń i ograniczyło ryzyko błędów w wykonywaniu obliczeń przez program.



Rysunek 1. Nowe propozycje wzorów przetłoczeń zaimplementowane do oprogramowania ANSYS

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 2. Wzór przetłoczeń ochroniacza dostępnego komercyjnie

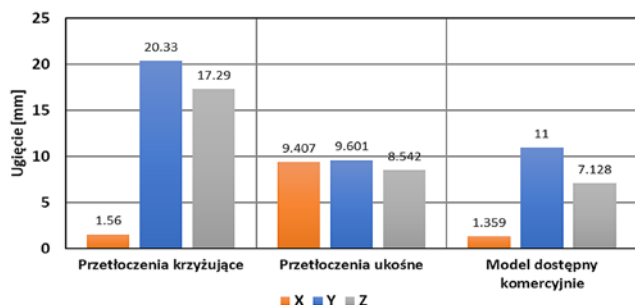
Źródło: opracowanie własne

4. Przeprowadzenie symulacji wytrzymałościowych pod kątem kształtu ochroniaczy

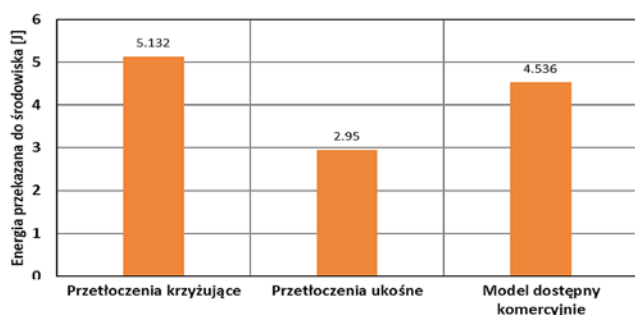
Symulacje wytrzymałościowe ochroniaczy przedramienia przeprowadzono z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS 19 oraz LS-DYNA. Elementy stanowiska badawczego zaimportowano do programu LS-DYNA, a następnie rozmieszczono w przestrzeni trójwymiarowej za pomocą operacji translacji. Zgodnie ze strategią badań przyjęto, że ruch kowadła zostanie zapoczątkowany w odległości 5 cm od powierzchni ochroniacza, z pełną i stałą prędkością 4,5 m/s. W eksperymencie zastosowano następujące warunki brzegowe: pominięto wpływ grawitacji (energia kowadła została zdefiniowana bezpośrednio w programie), nadano bijakowi (kuli) prędkość 4,5 m/s w kierunku normalnym do powierzchni ochroniacza, odebrane stopnie swobody zostały z wykorzystaniem funkcji *fixed support*, przypisano model materiałowy kopolimeru akrylonitrylo-butadienowo-styrenowego (ABS) do ochroniacza oraz stali do pozostałych elementów stanowiska, a także określono czas trwania symulacji w zakresie od 0,2 do 0,5 s.

Plik symulacji wygenerowano przy użyciu programu LS-PrePost 4.5, a obliczenia wykonano za pomocą narzędzia LS-Run 1.0. W pierwszej kolejności przeprowadzono symulację pełnego stanowiska badawczego, odwzorowując jego rzeczywistą konstrukcję. Następnie wykonano symulację zmodyfikowaną, zgodnie z założeniami opisanymi w punkcie 9a, polegającymi na zastąpieniu klasycznego bijaka kulą oraz zmianie sposobu podparcia osłony. Modyfikacja ta poprawiła jakość obliczeń, potwierdziła słuszność zastosowanych uproszczeń i dostarczyła większej ilości danych analitycznych, dlatego dalsze badania prowadzono w oparciu o tę wersję modelu.

Po zakończeniu obliczeń przystąpiono do analizy zebranych wyników, skupiając się na dwóch kluczowych parametrach: maksymalnym ugięciu twardej części ochroniacza (wykres 1, rysunek 3) oraz energią resztkową przekazaną do środowiska — zdefiniowanych obszarów podparcia (wykres 2).

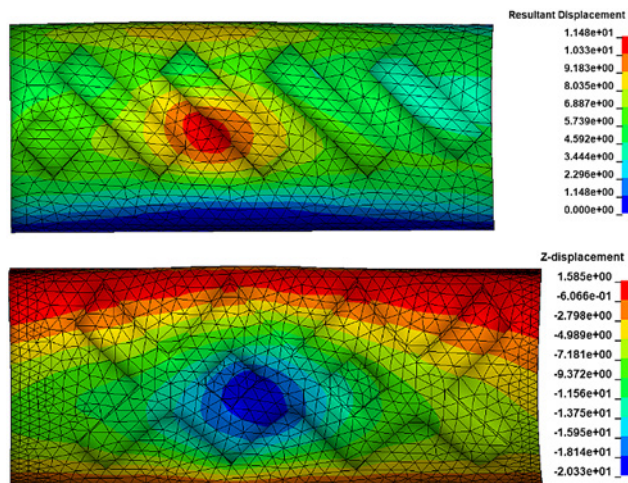


Wykres 1. Ugięcie karwasza po uderzeniu w kierunkach X, Y, Z [mm]
Źródło: badania własne



Wykres 2. Energia resztkowa przekazana do środowiska [J]
Źródło: badania własne

Najlepsze wyniki uzyskano dla projektu osłony z przetłoczeniami ukośnymi, niekrzyżującymi się. W tym wariantcie maksymalne ugięcie w kierunku ciała użytkownika było o około 13% mniejsze w porównaniu z osłoną obecnie stosowaną przez Policję, natomiast prędkość odbicia kuli — będąca miarą akumulacji energii kinetycznej — była niższa o 35%. Dodatkowo obserwowano bardziej równomierną dyssypację energii uderzenia, co świadczy o efektywniejszym rozpraszaniu energii dla takiej geometrii osłony. W konsekwencji taka konstrukcja charakteryzuje się wyższą sztywnością i może skuteczniej przeciwdziałać koncentracji energii w jednym punkcie i ograniczać ryzyko urazów u użytkownika.



Rysunek 3. Przedstawienie maksymalnego ugięcia osłony przedramienia po uderzeniu kulą
Źródło: badania własne

5. Badania laboratoryjne modeli fizycznych opracowanych kształtów

5.1. Wydruk 3D trzech kształtów części zewnętrznych (karwaszy) ochraniacza przedramienia

Wydruk osłon przedramienia realizowano przy użyciu drukarki Zmorph 2.0 SX, wykorzystując filament ABS o średnicy 1,75 mm w kolorze czarnym, wyprodukowany przez firmę Spectrum. Proces druku odbywał się w orientacji pionowej, czyli dłuższa oś osłony była ustawiona prostopadle do powierzchni stołu roboczego. Takie ustawienie pozwoliło na uniknięcie stosowania podpór oraz zapewniło, że warstwy wydruku układały się zgodnie z kierunkiem działania sił, co ograniczało ryzyko łamania się wydruku pod naciskiem. Temperatura stołu wynosiła 100°C, a ekstrudera 235°C. Komora drukarki została dodatkowo zaizolowana termicznie, aby zapobiec pękaniu materiału podczas stygnięcia.

Pierwsza seria osłon została wydrukowana w dwóch częściach w proporcji 1/3 do 2/3, co umożliwiło uzyskanie pełnowymiarowego modelu. Druga seria wydruków powstała w całości, co było możliwe dzięki nieznacznemu skróceniu osłony o fragmenty, które nie brały udziału w badaniu, zachowując przy tym funkcjonalność i odpowiednie wymiary badanego fragmentu. Uzyskane prototypy zostały przedstawione na fotografiach 1–2.



Fotografia 1. Dokumentacja fotograficzna: 1) drukarka 3D, wydruki niepełnowymiarowych (łączonych) części zewnętrznych ochraniacza przedramienia: 2) Przetłoczenia krzyżujące, 3) Przetłoczenia ukośne, 4) Przetłoczenia w modelu dostępnym komercyjnie
Źródło: opracowanie własne



Fotografia 2. Wydruki pełnowymiarowych części zewnętrznych ochraniacza przedramienia: 1) Przetłoczenia krzyżujące, 2) Przetłoczenia ukośne, 3) Przetłoczenia w modelu dostępnym komercyjnie
Źródło: opracowanie własne

5.2. Wyniki badań udarnościowych wydrukowanych części zewnętrznych ochraniacza przedramienia

Wydrukowane części zewnętrzne ochraniacza przedramienia zostały połączone z pianką poliuretanową PF M30N o grubości 5 mm a następnie zostały poddane badaniu w zakresie odporności na uderzenie zgodnie z procedurą badań udarnościowych. Najważniejsze parametry badania przedstawiono poniżej:

- bijak prętowy,
- kowadło z płytą pionową,
- energia uderzenia: $5,0 \pm 0,5$ J.

Badanie odporności na uderzenie wykazało, że spośród trzech badanych modeli części zewnętrznych ochraniacza przedramienia, model 3 osiągnął najwyższą skuteczność, przy zakładanych parametrach energii uderzenia na poziomie 5J. Zestawienie wyników badań udarnościowych zawarto w tabeli 1.

W oparciu o uzyskane wyniki, wariant osłony z przetłoczeniami ukośnymi, niekrzyżującymi się został wybrany jako najbardziej obiecujący i zakwalifikowany do dalszych badań oraz rozwoju koncepcji ochraniacza. Decyzja ta wynika z wyraźnych przewag tego rozwiązania pod względem ograniczenia maksymalnego ugięcia w kierunku ciała użytkownika, niższej prędkości odbicia kuli oraz bardziej równomiernej dyssypacji energii uderzenia, co przekłada się na zwiększoną skuteczność ochrony. Skuteczność tę potwierdzają wyniki symulacji, które są zgodne z rezultatami uzyskanymi podczas testów na rzeczywistych próbkach.

Wybrana konstrukcja stanowi podstawę do kolejnych etapów projektowych, w tym do szczegółowych testów materiałowych,

symulacji wytrzymałościowych oraz opracowania prototypów, które pozwolą na weryfikację funkcjonalności i komfortu użytkownika w warunkach zbliżonych do rzeczywistych. Wybór tego wariantu umożliwia dalsze optymalizowanie zarówno parametrów ochronnych, jak i ergonomii produktu, z myślą o maksymalnym bezpieczeństwie użytkownika.

6. Modele 3D

Trójwymiarowe (3D) modele ochraniacza przedramienia, przedstawione na rysunku 4, stanowią podstawę procesu projektowego, umożliwiającą dokładną analizę i wizualizację konstrukcji przed wykonaniem prototypu. Modele te zostały opracowane z wykorzystaniem oprogramowania CAD (ang. *Computer-Aided Design*), które pozwala na precyzyjne dopasowanie poszczególnych elementów ochraniacza. Poprawnie opracowane modele pozwalają na przeprowadzenie dalszych etapów prac, takich jak przygotowanie dokumentacji technicznej, symulacje wytrzymałościowe czy opracowanie form do wytwarzania elementów rzeczywistych.

7. Modele fizyczne

Modele fizyczne ochraniacza przedramienia zostały wykonane w celu praktycznej weryfikacji założeń projektowych oraz oceny rzeczywistego dopasowania konstrukcji do anatomii użytkownika. Dokumentacja fotograficzna tych modeli została przedstawiona na rysunku 5 i fotografii 3, ilustrując zarówno aspekty

Parametr	Przetłoczenia krzyżujące — wzór 1)	Przetłoczenia ukośne — wzór 2)	Model dostępny komercyjnie — wzór 3)	Jednostka	Metodyka badawcza
Maksymalna miejscowo przenoszona siła	2,52	1,79	5,39	kN	PBB-07, energia uderzenia $5,0 \pm 0,5$ J

Tabela 1. Wyniki badań udarnościowych części zewnętrznych ochraniacza przedramienia

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 4. Modele 3D ochraniacza przedramienia: widok z różnych perspektyw

Źródło: opracowanie własne



Rysunek 5. Modele fizyczne ochraniacza przedramienia

Źródło: opracowanie własne



Fotografia 3. Model fizyczny ochraniacza przedramienia — widok na sylwetkę

Źródło: opracowanie własne

techniczne, jak i praktyczne zastosowanie ochraniacza. Dzięki wykonaniu modeli fizycznych możliwe było przeprowadzenie wstępnych obserwacji dotyczących komfortu noszenia, mobilności użytkownika oraz skuteczności ochrony w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

8. Wyniki weryfikacji parametrów technicznych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki weryfikacji parametrów technicznych opracowanego ochraniacza przedramienia. Celem przeprowadzonych badań było sprawdzenie,

czy zaprojektowany element spełnia wymagania funkcjonalne i bezpieczeństwa określone dla tego typu środków ochrony indywidualnej. Analizie poddano kluczowe właściwości użytkowe, takie jak wytrzymałość mechaniczna, odporność na uderzenia, elastyczność oraz komfort noszenia. Uzyskane wyniki umożliwiają ocenę skuteczności zastosowanych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych, a także stanowią podstawę do ewentualnej optymalizacji projektu w dalszych etapach prac rozwojowych. Wyniki badań zestawiono w tabelach 2–7. Zastosowane materiały, jak i zaprojektowane rozwiązanie konstrukcyjne spełniły zakładane wymagania zarówno funkcjonalne, jak i użytkowe.

Chroniona powierzchnia ciała	Średnia (maksymalna) wartość przeniesionej siły [kN]	Typ bijaka — prętowy	Typ bijaka — z ostrzem	Typ kowadła	Energia uderzenia [J]
Przedramię	$\leq 8,0$ (12,0)	2,52	Brak przebicia	Płyta pionowa	$15,0 \pm 0,7$
		2,93	Brak przebicia		
Łokieć	$\leq 5,0$ (7,5)	3,37	Brak przebicia	Walec R-35mm	$7,5 \pm 0,3$
		2,37	Brak przebicia		

Tabela 2. Wyniki badań ochronnych zaprojektowanego modelu ochraniacz przedramienia

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Parametr	Wartość założona	Wartość osiągnięta	Jednostka	Metoda badania lub sposób potwierdzenia
1.	Temperatura — zakres stosowania	-40 do +65	-40 do +100	°C	Deklaracja producenta
2.	Gęstość pozorną, nie mniej niż:	210	206	kg/m ³	PN-EN ISO 845:2010
3.	Grubość, nie więcej niż:	6	$4,5 \pm 0,2$	mm	PN-EN ISO 1923:1999

Tabela 3. Wyniki badań dla materiałów przeznaczonych na część miękką (wewnętrzną) ochraniacza przedramienia

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Parametr	Wartość założona	Wartość osiągnięta	Jednostka	Metoda badania lub sposób potwierdzenia
1.	Masa powierzchniowa	$240 \pm 30\%$	286	g/m ²	PN-EN 38001:1993
2.	Wytrzymałość na zrywanie: — osnowa — wątek, nie mniej niż:	1300 700	2300 1400	N N	PN-EN ISO 13934-1:2013-07
3.	Wytrzymałość na rozdzielanie, nie mniej niż: — osnowa — wątek,	70 40	127 81	N N	PN-EN ISO 13937-2:2002
4.	Odporność wybarwień na pranie w temp. 40°C, nie mniej niż:	4	4/5	stopień	PN-EN ISO 105-C06:2010
5.	Odporność wybarwień na światło sztuczne, nie mniej niż:	4	6	stopień	PN-EN ISO 105-B02:2014-11
6.	Oleofobowość, nie mniej niż:	4	4,5	stopień	PN-EN ISO 14419:2010
7.	Odporność na tarcie suche i mokre, nie mniej niż:	4	$\frac{4}{5}$ 4	stopień	PN-EN ISO 105-X12:2016-08
8.	Odporność na pot kwaśny i alkaliczny, nie mniej niż:	4	4/5	stopień	PN-EN ISO 105-E04:2013-06
9.	Ograniczone rozprzestrzenianie płomienia: — osiągnięcie przez płomień górnej lub pionowej krawędzi — czas następczego spalania — czas następczego Żarzenia — występowanie szczątek — powstanie dziury	nie występuje 0 0 0 0 nie występuje nie występuje	nie występuje 0 0 0 0 nie występuje nie występuje	s	PN-EN ISO 15025:2017-02

Tabela 4. Wyniki badań dla materiałów dodatkowych przeznaczonych na część miękką (wewnętrzną) ochraniacza przedramienia — tkanina zasadnicza zastosowana na poszycie

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Parametr	Wartość założona	Wartość osiągnięta	Jednostka	Metoda badania lub sposób potwierdzenia
1.	Napężenie przy zerwaniu, nie mniej niż	25	30,1	MPa	PN-EN ISO 527-2:2012
2.	Moduł sprężystości przy rozciąganiu, nie mniej niż	1300	1620	MPa	PN-EN ISO 527-2:2012
3.	Ciężar właściwy, nie mniej niż	1,0	1,04	g/cm ³	PN-EN ISO 845:2010

Tabela 5. Wyniki badań dla materiału przeznaczonego na część twardą ochraniacza

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Charakterystyka wskaźnika	Wartość założona	Wartość osiągnięta	Jednostka	Metoda badania lub sposób potwierdzenia
1.	Masa powierzchniowa	410 ± 25	436	g/m ²	PN-P-04613:1997
2.	Grubość	5,0 ± 0,5	5,49	mm	PN-EN ISO 5084:1999
3.	Wytrzymałość na przebicie kulką, nie mniej niż:	100	110	N	PN-EN ISO 9073-5:2008
4.	Ograniczone rozprzestrzenianie płomienia:				PN-EN ISO 14116:2015-12
	— osiągnięcie przez płomień górnej lub pionowej	nie występuje	nie występuje	nie dotyczy	
	— czas następczego spalania	0	0	sekunda	
	— czas następczego żarzenia	0	0	sekunda	
	— występowanie szczątków	nie występuje	nie występuje	nie dotyczy	
	— powstawanie dziury	nie występuje	nie występuje	nie dotyczy	
5.	Odporność wybarwień na pot kwaśny i alkaliczny, nie mniej niż:	4	4/5	stopień	PN-EN ISO 105-E04:2013-06
6.	Odporność wybarwień na tarcie suche i mokre, nie mniej niż:	3/4	3/4	stopień	PN-EN ISO 105-X12:2016-08

Tabela 6. Wyniki badań dla dzianiny dystansowej 3D

Źródło: opracowanie własne

Lp.	Parametr	J.m.	Wartość założona	Wartość osiągnięta — tkanina zasadnicza	Wartość osiągnięta — dzianina 3D	Metodyka badań lub sposób potwierdzenia
1.	Zawartość amin aromatycznych, nie więcej niż:	mg/kg	30	Nie stwierdzono	Nie stwierdzono	PN-EN 14362-1:2017-04 PN-EN 14362-3:2017-04
2.	Zawartość formaldehydu, nie więcej niż:	mg/kg	75	Nie wykryto	24,1	PN-EN ISO 14184-1:2011
3.	Odczyn pH	jedn. pH	4,5 ÷ 7,5	6,1	3,3	PN-EN ISO 3071:2007
4.	Zawartość metali ciężkich w zmineralizowanej próbce, nie więcej niż:	Ołów (Pb)	mg/kg	90,0	Nie wykryto	PN-EN 16711-1:2016-01
		Kadm (Cd)		40,0	Nie wykryto	
	Zawartość ekstrahowanych metali ciężkich, nie więcej niż:	Arsen (As)		1,0	Nie wykryto	PN-EN 16711-2:2016-01
		Rtęć (Hg)		0,02	Nie wykryto	

Tabela 7. Wyniki badań dotyczące bezpieczeństwa użytkownika dla tkaniny zasadniczej oraz dzianiny dystansowej 3D

Źródło: opracowanie własne

9. Model konstrukcyjny ochraniacza

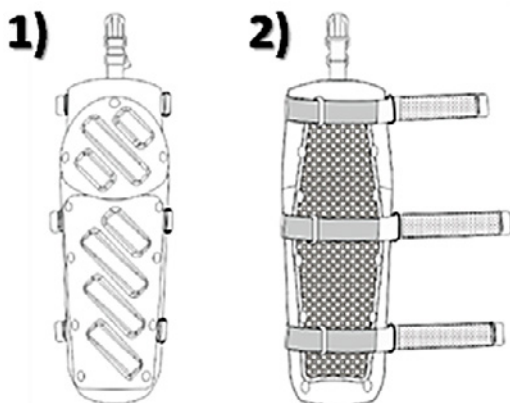
W kolejnym etapie prac opracowano model konstrukcyjny ochraniacza przedramienia w formie dwuwymiarowej (2D), składający się z dwóch integralnych części: miękkiej oraz twardej. Szczegółowe rozwiązania konstrukcyjne przedstawiono na rysunkach 6–7. Średnia masa jednego nowo opracowanego ochraniacza wyniosła 340 g, co oznacza redukcję o 15% w stosunku do obecnie stosowanego rozwiązania. Redukcja masy została osiągnięta przy jednoczesnym zachowaniu wymaganych parametrów ochronnych oraz funkcjonalnych, zgodnych z obowiązującymi normami.

Konstrukcja ochraniacza przewiduje sześć wariantów rozmiarowych, co umożliwi bardziej precyzyjne dopasowanie do użyt-

kownika niż w dotychczasowym rozwiązaniu, w którym dostępne były cztery rozmiary. Nowy system rozmiarowy uwzględnia skok rozmiarowy odnoszący się do wzrostu użytkownika co 6–8 cm (wcześniej co 8–12 cm), co przekłada się na lepsze odwzorowanie rzeczywistych różnic anatomicznych. Należy podkreślić, że wymiary części ochronnej ochraniacza zostały określone zgodnie z wymaganiami normy BS 7971-4:2002, która precyzuje sposób nadawania rozmiarów na podstawie wartości kontrolnych ciała użytkownika noszącego największy rozmiar, dla którego potwierdzono prawidłowe dopasowanie. Wzrost użytkownika ma zatem bezpośrednie przełożenie na długość kończyny górnej, a tym samym na właściwe dopasowanie rozmiaru ochraniacza przedramienia. Dlatego też dotychczasowe stopniowanie rozmiaru ochraniacza co 8–12 cm należy uznać

za mało precyzyjne, gdyż prowadziło do zbyt dużego przyrostu długości w stosunku rzeczywistych różnic antropometrycznych użytkowników.

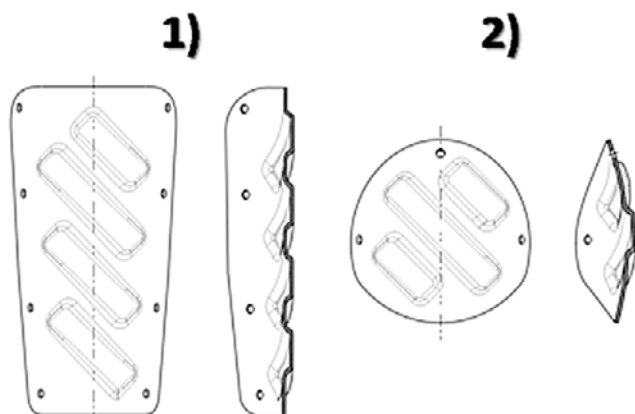
Nowo opracowany system rozmiarowy ochraniacza przedramienia jest w pełni kompatybilny z pozostałymi elementami zestawu przeciwuderzeniowego. Tabela 8 przedstawia zasady doboru zestawu przeciwuderzeniowego z uwzględnieniem nowego modelu ochraniacza przedramienia.



Rysunek 6. Ochraniacz przedramienia — rysunki 2D: 1) przód, 2) tył.
Źródło: opracowanie własne

Wymiary użytkownika		Kamizelka przeciwuderzeniowa — Rozmiary wg ST	Ochraniacz przedramienia
Wzrost	Obwód klatki piersiowej		
158–164	92–98	L	I
164–170	98–104		II
170–176	104–112	XL	III
176–184	112–120		IV
184–192	120–128	XXL	V
192–200	128–132		VI

Tabela 8. Tabela rozmiarowa ochraniacza przedramienia
Źródło: opracowanie własne



Rysunek 7. Ochraniacz przedramienia — konstrukcja karwaszy: 1) przedramienia i 2) łokcia.
Źródło: opracowanie własne

10. Weryfikacja skuteczności konstrukcji w środowisku wirtualnym i warunkach rzeczywistych

Ocenę charakterystyki ergonomicznej oraz kompatybilności ochraniacza przedramienia przeprowadzono zgodnie z Procedurą badawczą opartą na wymaganiach normy BS7971-1:2002. Zastosowanie procedury zgodnej z wymaganiami normatywnymi umożliwiło uzyskanie wiarygodnych danych dotyczących ergonomii ochraniacza przedramienia w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Badania przeprowadzono z udziałem funkcjonariuszy Oddziału Prewencji Policji w Łodzi (fotografia 4). Kryterium doboru uczestników był wzrost, zgodny z założeniami ochraniacza rozmiaru IV, przeznaczonego dla użytkowników o wroście mieszczącym się w przedziale 176–184 cm.

Opinie respondentów wskazują na wysoką ocenę funkcjonalności i ergonomii testowanego rozwiązania. Ze względu na konstrukcję kwestionariusza, uczestnicy mieli również możliwość porównania nowo zaprojektowanego modelu z obecnie stosowanym w służbie ochraniaczem. Wśród udzielonych opinii zwrócono uwagę na szereg istotnych zalet nowego rozwiązania. Zastosowany system regulacji został oceniony jako bardziej ergonomiczny i funkcjonalny — w odróżnieniu od obecnie używanego modelu, w którym zastosowano szerokie i sztywne taśmy, testowany ochraniacz wyposażono w bardziej elastyczne paski oraz udoskonalony układ regulacyjny, który zapobiega wysuwaniu się taśm z oczek. Takie rozwiązanie znacząco ułatwia samodzielne zakładanie i dopasowanie elementu do przedramienia. Istotnym atutem testowanego modelu jest również zastosowanie dzianiny dystansowej 3D po stronie wewnętrznej (od strony ciała), która zapewnia zwiększony komfort użytkowania dzięki miękkiej strukturze oraz poprawionej cyrkulacji powietrza. Ponadto wskazano, że nowy model ochraniacza charakteryzuje się mniejszą masą i bardziej kompaktową budową, co przekłada się na lepszą funkcjonalność. Uczestnicy badania podkreślili również, iż konstrukcja ochraniacza umożliwia większą swobodę ruchu kończyny górnej oraz lepszą stabilność w przypadku braku jego połączenia z ochraniaczem barku — nie dochodzi wówczas do jego zsuwania się.

Kompatybilność ochraniacza przedramienia z wybranymi elementami zestawu przeciwuderzeniowego (kamizelka przeciwuderzeniowa i ochraniacz barku) zweryfikowano podczas testów sprawnościowo-motorycznych, przeprowadzonych zgodnie z normą BS 7971-1:2002. W celu rozszerzenia zakresu oceny, po zakończeniu testów fizycznych uczestnicy zostali poddani testom w środowisku wirtualnym (dalej jako: VR). Testy te miały na celu końcową weryfikację kompatybilności, integracji funkcjonalnej oraz ergonomii użytkowania zestawu przeciwuderzeniowego w warunkach zbliżonych do operacyjnych.

Nowo zaprojektowany ochraniacz przedramienia wykazał wysoką kompatybilność zarówno względem siebie, jak i w odniesieniu do pozostałych testowanych elementów zestawu przeciwuderzeniowego.

Po pozytywnym zakończeniu badań w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, przystąpiono do badań użytkowych w warunkach realnej służby funkcjonariuszy Policji użytkujących zestaw przeciwuderzeniowy. Badanie przeprowadzono wśród 10 funkcjonariuszy Oddziału Prewencji Policji w Łodzi (fotografia 5). Okres testowania obejmował rzeczywiste działania służbowe w różnych warunkach środowiskowych. Zakres



Fotografia 4. Użytkownik na bieżni VR, testujący kompatybilność ochraniacza przedramienia i kamizelki balistycznej, wyposażony w gogle oraz kontrolery, przechodzący różne fazy treningu w Wirtualnej Rzeczywistości

Źródło: opracowanie własne



Fotografia 5. Dokumentacja fotograficzna badania przeprowadzonego wśród funkcjonariuszy Oddziału Prewencji Policji w Łodzi: 1) wizualizacja ochraniacza przedramienia nowej generacji założonego przez funkcjonariusza, 2) wizualizacja ochraniacza przedramienia podczas działań nocnych, 3) wizualizacja ochraniacza przedramienia nowej generacji wraz z innymi elementami zestawu przeciwwuderzeniowego, 4) funkcjonariusze Oddziału Prewencji Policji w Łodzi wyposażeni w ochraniacze przedramienia nowej generacji w trakcie symulacji zagrożenia.

Źródło: opracowanie własne

użytkowania nowoopracowanego ochraniacza przedramienia obejmował:

- służbę w terenie miejskim (patrole piesze, ulice, place);
- służbę w terenie otwartym (np. tereny wiejskie, pola, drogi);
- zabezpieczanie imprez masowych np. na stadionach / manifestacji / zgromadzeń publicznych;
- interwencje w budynkach (np. obiekty użyteczności publicznej, lokale prywatne).

Role/zadania pełnione podczas użytkowania nowoopracowanego ochraniacza przedramienia:

- zabezpieczanie imprez masowych, zgromadzeń;
- zadania patrolowo-interwencyjne, interwencje uliczne;
- udział w szkoleniach i ćwiczeniach terenowych.

Każdy respondent oceniał produkt w oparciu o własne doświadczenia eksploatacyjne, wypełniając ankietę obejmującą trzy główne obszary:

- ocena trwałości, funkcjonalności i użyteczności (ergonomia, biofizyka, funkcjonalność, materiały);

- porównanie z ochraniaczem dotychczas stosowanym;
- ogólna satysfakcja i rekomendacje użytkownika.

Na podstawie przyjętych założeń przyjęto następujące kryteria oceny pozytywnej prototypu:

- co najmniej 60% odpowiedzi pozytywnych („TAK” / „zdecydowanie lepszy” / „raczej pozytywnie”) w zakresie kluczowych aspektów funkcjonalnych i ergonomicznych;
- brak istotnych uwag dotyczących bezpieczeństwa, podrażnień skóry, ograniczenia krążenia czy trwałości materiałów;
- pozytywna ocena ogólna (średnia $\geq 4,0$) w skali 1–5;
- co najmniej 60% respondentów deklarujących chęć użytkowania nowego ochraniacza w codziennej służbie.

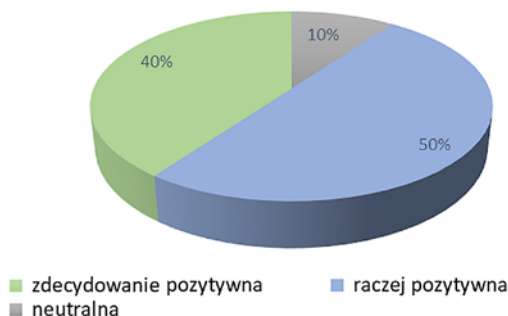
Przeprowadzone badania ankietowe, obejmujące grupę dziesięciu użytkowników testujących nowoopracowany ochraniacz przedramienia w warunkach rzeczywistej eksploatacji, wykazały jego wysokie walory użytkowe. Ocenie poddano aspekty ergonomiczne, konstrukcyjne, biofizyczne, funkcjonalne oraz materiałowe. Uzyskane wyniki wskazują na niemal pełną zgodność

pozytywnych opinii we wszystkich analizowanych kategoriach, co potwierdza wysoką jakość opracowanego rozwiązania. Pod względem ergonomii i konstrukcji ochraniacz został oceniony wyjątkowo dobrze. Wszyscy badani (100%) potwierdzili właściwy zakres ochrony, prawidłowe dopasowanie do kształtu przedramienia, intuicyjną konstrukcję ułatwiającą zakładanie oraz skuteczny system regulacji. Jedynie w pojedynczych przypadkach (10–20%) odnotowano drobne uwagi dotyczące długości lub stabilności elementu podczas bardzo dynamicznych działań, nie wpływające istotnie na funkcjonalność wyrobu.

W zakresie właściwości biofizycznych użytkownicy jednoznacznie pozytywnie ocenili bezpieczeństwo materiałowe (100%), komfort termiczny i fizyczny, a także lekkość konstrukcji. Zastosowana siatka dystansowa 3D została uznana przez wszystkich respondentów za skuteczne rozwiązanie poprawiające wentylację i odprowadzanie ciepła. Ochraniacz nie powodował ucisku ani podrażnień skóry, a jego noszenie było oceniane jako wygodne nawet przy długotrwałym użytkowaniu. Analiza funkcjonalności potwierdziła wysoką użyteczność konstrukcji w praktyce służbowej. System zapięć i taśm regulacyjnych uznano za prosty i ergonomiczny, a sam ochraniacz — za stabilny, łatwy w konserwacji i odporny na warunki atmosferyczne. U 80–90% respondentów wyrób nie ograniczał wykonywania czynności precyzyjnych, takich jak obsługa wyposażenia taktycznego. Równie pozytywne wyniki uzyskano w ocenie trwałości zastosowanych materiałów. Wszyscy badani (100%) potwierdzili odporność na uszkodzenia mechaniczne, brak farbowania tkanin oraz brak reakcji alergicznych czy podrażnień skóry. Po testach eksploatacyjnych nie stwierdzono żadnych śladów zużycia ani degradacji materiału.

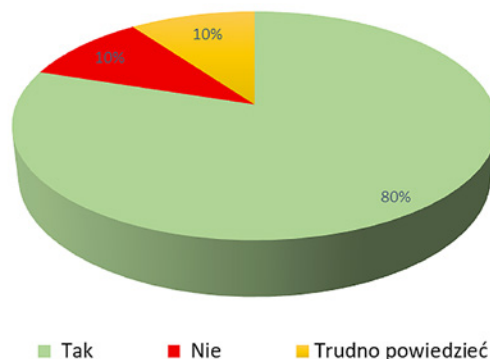
W części porównawczej nowo opracowany ochraniacz przedramienia zestawiono z obecnie stosowanym ochraniaczem. Użytkownicy wskazali znaczną poprawę komfortu (80%), lepsze dopasowanie do przedramienia (80%), większą swobodę ruchu (80%) i lepszą stabilność mocowania (70%). Wszyscy badani (100%) uznali nowy ochraniacz za bardziej funkcjonalny, ergonomiczny i odpowiedni do codziennego użytkowania, a także wyrazili chęć jego stosowania w praktyce służbowej.

Końcowa ocena satysfakcji użytkowników potwierdza wysoką akceptację produktu — średnia nota ogólna wyniosła 4,3 w pięciostopniowej skali, bez żadnych ocen negatywnych (wykres 3). Aż 80% badanych deklaruje gotowość do użytkowania nowego modelu w codziennej służbie, co przekracza przyjęty próg 60% i potwierdza wysoką akceptację produktu przez użytkowników (wykres 4).



Wykres 3. Ocena użytkowników testowanego nowo opracowanego ochraniacza przedramienia

Źródło: opracowanie własne



Wykres 4. Gotowość użytkowników do stosowania nowo opracowanego ochraniacza przedramienia w codziennej służbie

Źródło: opracowanie własne

11. Wnioski

Zaproponowane rozwiązania nowej generacji zestawu przeciwuderzeniowego i umundurowania dla funkcjonariuszy oddziałów prewencji wykazały znaczące zwiększenie ochrony osobistej przy jednoczesnej redukcji masy o 15% oraz poprawie ergonomii, co przekłada się na podniesienie komfortu użytkowania oraz efektywności działań operacyjnych. Demonstratory technologiczne potwierdziły wysoką kompatybilność zaprojektowanych elementów ochraniacza oraz możliwość indywidualnego dopasowania wyposażenia do zróżnicowanych ról i zadań funkcjonariuszy, co stanowi istotny krok w kierunku personalizacji środków ochrony indywidualnej. Opracowane specyfikacje techniczne tworzą solidną podstawę do produkcji seryjnej i dalszych prac wdrożeniowych, gwarantując powtarzalność parametrów funkcjonalnych i bezpieczeństwa. Zweryfikowane zostały różne warianty konstrukcyjne części twardej ochraniacza z wykorzystaniem oprogramowania do projektowania wpieranego komputerowo oraz oprogramowania do analizy wytrzymałości metodą elementów skończonych. Pozwoliło to na wybór najbardziej korzystnej geometrii części twardej ochraniacza charakteryzującej się optymalnym rozkładem naprężeń, wysoką sztywnością oraz możliwie najlepszym rozpraszaniem energii w wyniku uderzenia białym. Integracja zaawansowanych funkcjonalności, ergonomicznej konstrukcji oraz ograniczonej masy stanowi innowacyjne podejście do projektowania środków ochrony indywidualnej, umożliwiając skuteczne działanie w środowiskach o wysokim ryzyku zagrożenia zdrowia i życia, przy jednoczesnym zwiększeniu bezpieczeństwa, komfortu i operacyjności służb mundurowych. Proponowane rozwiązania mogą zatem stanowić nowy standard wyposażenia w warunkach wysokiego zagrożenia.

Ponadto przeprowadzone badania ergonomii użytkowania jednoznacznie potwierdzają wysoką jakość oraz pełną użyteczność nowo opracowanego ochraniacza przedramienia w warunkach rzeczywistej eksploatacji. Ochraniacz zapewnia właściwy zakres ochrony, doskonałe dopasowanie i komfort użytkowania, a zastosowane rozwiązania — takie jak siatka dystansowa 3D, czy intuicyjny system regulacji — skutecznie poprawiają wentylację, swobodę ruchu i stabilność mocowania. W porównaniu z dotychczas stosowanym modelem, nowy wyróżnia się wyraźnie lepszą ergonomią, większą swobodą ruchu i wyższym komfortem, co potwierdza większość respondentów. Średnia ocena 4,3/5 oraz wysoki odsetek użytkowników deklarujących

gotowość do stosowania ochraniacza w codziennej służbie wskazują, że spełnia on oczekiwania użytkowników i stanowi wartościowe, wysoce akceptowane rozwiązanie praktyczne.

Bibliografia

- British Standards Institution, BS 7971-10:2014 — *Protective clothing and equipment for use in violent situations and in training. Coveralls. Requirements and test methods*, London 2014.
- Achim C., *Ergo-policing. Improving Safety and Ergonomic Requirements of Human Resources Involved in Police Duties*, 'Procedia — Social and Behavioral Sciences' 2014, nr 124.
- den Heyer G., *Ghosts of Policing Strategies Past: Is the New Zealand Police 'Prevention First' Strategy Historic, Contemporary or the Future?*, 'Public Organization Review' 2016, nr 16.
- Gijssbertse K., *The effects of mass, bulk and stiffness of personal protective equipment and clothing on physical performance when performing a military mobility obstacle course*, 'Applied Ergonomics' 2021, nr 95.
- Hudson S. i in., *'We just make do': the use, comfort and functionality of personal protective equipment in the UK mounted police*, 'Ergonomics' 2025, nr 68.
- Hudson S. i in., *The comfort and functional performance of personal protective equipment for police officers: a systematic scoping review*, 'Ergonomics' 2024, nr 67.
- Jewett B.R. i in., *The effects of equipment carriage on functional movement quality among law enforcement officers*, 'Ergonomics' 2023, nr 66.
- Wozniak K.H., Drakulich K.M., Calfano B.R., *Public Opinion About Police Weapons and Equipment: An Exploratory Analysis*, 'Criminal Justice Policy Review' 2021, nr 32.
- Madej-Kielbik L. i in., *Effect of Accelerated Ageing on the Mechanical and Structural Properties of the Material System Used in Protectors*, 'Polymers' 2019, nr 11.
- Locatelli M.C., *Low back pain in military police activity: analysis of prevalence, associated factors, and ergonomics*, 'Revisita Brasileira de Medicina do Trabalho' 2021, nr 19.
- Parmar M.S., Kapil N., Sisodia N., *Development of a Unique Stab and Impact Resistant Material for Anti-riot Body Protector* [w:] Majumdar A., Gupta D., Gupta S. (red.), *Functional Textiles and Clothing*, Singapur 2020.
- Pieniak D. i in., *Influence of Thermal Shocks on Residual Static Strength, Impact Strength and Elasticity of Polymer-Composite Materials Used in Firefighting Helmets*, 'Materials' 2022, nr 15.
- Dempsey P.C., Handcock P.J., Rehner N.J., *Impact of police body armour and equipment on mobility*, 'Applied Ergonomics' 2013, nr 44.
- Eliasson K. i in., *A user-centred development process for an equipment vest for the Swedish police force*, 'International Journal of Human Factors and Ergonomics' 2024, nr 11.
- Marins E.F. i in., *Cristine Lima Alberton, Exploring police ergonomics: Effects of personal protective equipment, holster position and perceived discomfort on different gait intensities*, 'Applied Ergonomics' 2025, nr 125.
- Sitotaw D.B. i in., *A Review on the Performance and Comfort of Stab Protection Armor*, 'Autex Research Journal' 2022, nr 22.
- Strese H., *Influence of finishing textile materials on the reduction of skin irritations*, 'Skin Research and Technology' 2013, nr 19.