

Wojskowa Akademia Techniczna

im. Jarosława Dąbrowskiego

Wydział Inżynierii Mechanicznej



ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Marek Walicki

BADANIA ROZWOJOWE BALISTYCZNYCH WKŁADÓW KOMPOZYTOWYCH DO OCHRONY PERSONALNEJ PRZED POCISKAMI KARABINOWYMI

Promotor:

dr hab. inż. Jacek Janiszewski

Promotor pomocniczy z ramienia firmy:

Andrzej Szpalerski (CFT Precyzja Sp. z o.o.)

Warszawa 2024

strona celowo zostawiona pusta

strona celowo zostawiona pusta

strona celowo zostawiona pusta

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	7
WPROWADZENIE	8
ROZDZIAŁ I Analiza literaturowa.....	10
1.1. Zarys historyczny	10
1.2. Poziomy odporności balistycznych dla wkładów balistycznych ochrony personalnej..	12
1.3. Metody badań systemów balistycznych	18
1.4. Istota odporności balistycznej osłony personalnej	22
1.5. Konstrukcje i materiały stosowane na systemy osłon balistycznych	23
1.6. Mechanizm absorpcji energii kinetycznej pocisku	24
1.7. Technologie wytwarzania kompozytów	30
1.8. Podsumowanie analizy literaturowej	31
ROZDZIAŁ II Studium wykonalności.....	33
2.1. Analiza trendu i dobór parametrów	33
2.2. Przegląd dostępnych technologii firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.....	38
2.3. Podsumowanie i wnioski wynikające z analizy studium wykonalności.....	41
ROZDZIAŁ III Cel i zakres pracy	42
3.1. Cel pracy	42
3.2. Zakres rozprawy	43
ROZDZIAŁ IV Materiały, przygotowanie próbek i metody badawcze.....	46
4.1. Charakterystyki materiałów i ich dobór.....	46
4.1.1. Opracowanie założeń dla półfabrykatów/materiałów ze szczególnym uwzględnieniem wymagań dotyczących masy wkładu kompozytowego.....	46
4.1.2. Wytypowanie materiałów włóknistych możliwych do zastosowania w technologii produkcyjnej firmy	53
4.1.3. Analiza wytypowanych materiałów oraz konstrukcji wkładów balistycznych ze względu na czynniki ekonomiczne i konkurencyjność rynkową.....	54
4.2. Przygotowanie próbek – technologia produkcji.....	55
4.2.1. Próbkki tkanin do badań quasi-statycznych	55
4.2.2. Próbkki do badań balistycznych.....	57
4.3. Metody badawcze.....	61
4.3.1. Badanie quasi-statyczne – układ badawczy.....	61
4.3.2. Metodyka badania odłamko-odporności	67
4.3.3. Metodyki badania odporności balistycznej.....	70
ROZDZIAŁ V Wyniki badań własnych i ich analiza	72
5.1. Weryfikacja stanowiska do badań quasi-statycznych	72

5.2.	Quasi-statyczne badania wytypowanych tkanin balistycznych	74
5.3.	Badanie cech balistycznych materiałów/półfabrykatów (ostrzał małokalibrowy).....	77
5.4.	Ocena wyników badań tkanin i uzasadnienie wyboru materiałów dla uproszczonego rozwiązania konstrukcyjnego wkładu balistycznego	80
5.5.	Badania balistyczne na uproszczonych modelach wkładów ochronnych	82
5.6.	Analiza wyników badań balistycznych na uproszczonych modelach wkładów ochronnych.....	87
5.7.	Modyfikacja konstrukcji i wykonanie prototypów wkładów balistycznych.....	89
5.8.	Badania balistyczne konstrukcji prototypowych	91
5.9.	Analiza wyników badań balistycznych konstrukcji prototypowych	92
5.10.	Eliminacja konstrukcji o niskim współczynniku rokowania i założenia konstrukcyjne po modyfikacji dla prototypów przedprodukcyjnych.....	93
5.11.	Modyfikacje konstrukcji i wykonanie prototypów przedprodukcyjnych do badań weryfikacyjnych.....	95
5.12.	Badania weryfikacyjne zgodnie z założonym standardem	97
5.13.	Analiza wyników badań balistycznych prototypów przedprodukcyjnych	99
ROZDZIAŁ VI Opracowanie technologii produkcji przemysłowej.....		102
6.1.	Opracowanie planu wdrożenia produkcji dla różnych etapów zapotrzebowania produkcyjnego	102
6.1.1.	Cele wdrożenia	103
6.1.2.	Zasoby i zadania	103
6.1.3.	Schemat produkcji	105
6.1.4.	Zarządzanie jakością	107
6.1.5.	Ryzyka i zagrożenia	107
6.2.	Możliwości dalszego rozwoju konstrukcji opracowanego wkładu	109
ROZDZIAŁ VII Podsumowanie i wnioski.....		110
Spis Tabel		114
Spis Rysunków		116
Bibliografia		118
Załącznik nr. 1 – Katalog firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.		125
Załącznik nr. 2 – Raport z badań nr 002/04/2021		137
Załącznik nr. 3 – Raport z badań nr 003/04/2021		138
Załącznik nr. 4 – Raport z badań nr 002/05/2021		139
Załącznik nr. 5 – Raport z badań nr 005/01/2022		140
Załącznik nr. 6 – Raport z badań nr 006/01/2022		141
Załącznik nr. 7 – Rysunki konstrukcyjne układu mocowania próbki.....		142

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

- AP (*ang. Armor Piercing*) – oznaczenie pocisków przeciwpancernych
- BFD (*ang. Backface Deformation*) – pomiar deformacji podłoża balistycznego wyrażony w mm.
- BFS (*ang. Backface Signature*) – pomiar deformacji podłoża balistycznego wyrażony w mm.
- CP (*ang. Complete penetration*) – Strzał z całkowitą penetracją materiału, pocisk lub odłamki przedostają się poza układ materiałowy
- DOP (*ang. Depth-of-Penetration Testing*) - Test głębokości penetracji
- FSP (*ang. Fragment Simulating Projectile*) – pocisk symulujący odłamek
- ICW (*ang. In Conjunction With*) – płyta ochronna typu twardego spełniająca wymaganą odporność balistyczną wyłącznie z dedykowanym miękkim wkładem balistycznym pod spodem
- KE (*ang. Kinetic Energy*) – Energia kinetyczna
- LVI (*ang. low-velocity impact*) – uderzenie z niską prędkością – w tym wypadku określenie metody
- PDW (*ang. personal defence weapon*) – nowe rodzaje broni do obrony osobistej, przeznaczone głównie dla artylerzystów, saperów, lotników, członków pojazdów zmechanizowanych np. pistolety P90, 5,7 mm, 4,6 mm H&K
- PIPD (*ang. polyhydroquinone-diimidazopyridine*) - polihydrochinono-diimidazopyrydyna
- PP (*ang. Partial penetration*) – Strzał z częściową penetracją materiału, jednak pocisk i wszystkie odłamki nie przedostają się poza układ materiałowy
- RVE (*ang. representative volume element*) – reprezentatywny model objętościowy
- RTM (*ang. Resin Transfer Moulding*) - proces niskociśnieniowego wtrysku żywicznej mieszanki impregnującej do form zamkniętych
- SA (*ang. Stand Alone*) – samonośna płyta ochronna typu twardego
- STANAG – (*ang. Standarization NATO Agreement*), porozumienie standaryzujące NATO,
- STM (*ang. Specific Tensile Modulus*) - moduł właściwy przy rozciąganiu
- STS (*ang. Specific Tensile Strength*) – wytrzymałość właściwa przy rozciąganiu
- TRL (*ang. Technology Readiness Level*) – Poziom gotowości technologicznej
- UD (*ang. Uni-directional*) – jednokierunkowy (kierunek ułożenia włókien)
- UHMWPE (*ang. ultra-high-molecular-weight polyethylene*) - Włókna polietylenowe o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej
- VIP (*ang. Very Important Person*) - osoba szczególnie ważna

WPROWADZENIE

Współczesna technika od zarania dziejów opierała się na technologiach militarnych. To właśnie te technologie były motorem napędowym dla wielu znanych współcześnie rozwiązań stosowanych powszechnie w sektorze cywilnym. Sam pomysł ochrony personalnej, w postaci wszelkich osłon, towarzyszy ludzkości od dawna, a dokładnie od czasów, kiedy pojawiły się pierwsze konflikty i potrzeba ochrony.

Obecnie znaczna większość konstrukcji, szeroko-rozumianej techniki, wymaga optymalizacji masy przy zachowaniu oczekiwanych parametrów technicznych, a niejednokrotnie także ich zwiększeniu. W przypadku osłon balistycznych mała masa pancerza wiąże się z osiągnięciem wysokiej manewrowości i szybkości przemieszczania się np. wozu bojowego. To właśnie te cechy w połączeniu z zastosowaniem pancerza o wysokiej klasy odporności, zapewniającego ochronę przed ówczesnie stosowanymi środkami rażenia, decydowały o przeżywalności na polu bitwy.

Kamizelki kuloodporne są stosunkowo nowym rozwiązaniem, gdyż pomimo wcześniej stosowanych osłon w postaci zbroi i innego typu systemów ochrony, ich dynamiczny rozwój przypada na wiek XX. To właśnie w tych czasach technika przeszła największą transformację i dokonano największego postępu w zakresie stosowanych materiałów konstrukcyjnych. Dzięki opracowaniu nowoczesnych materiałów oraz postępowi w technologii ich produkcji, możliwe jest używanie kamizelek kuloodpornych z ochroną przed bronią krótką przez osoby cywilne (VIP, przedstawiciele rządowi, jak i osoby podróżujące do stref konfliktów). Rozwój zaawansowanych materiałów inżynierskich znajduje często odzwierciedlenie w stosowaniu ich w konstrukcjach ochronnych o przeznaczeniu wojskowym i policyjnym zapewniającym ochronę przed bronią długą w tym również przed pociskami przeciwpancernymi (np. rdzenie na bazie wolframu lub rdzenie utwardzane).

W niniejszej rozprawie dokonano analizy dostępnych materiałów i rozwiązań konstrukcyjnych osłon balistycznych w celu opracowania uniwersalnego wkładu balistycznego do kamizelki kuloodpornej z możliwością jego rozwoju na wyższe poziomy ochronne. Ponadto, w pracy zaproponowano technologię wytwarzania lekkich wkładów balistycznych z uwzględnieniem możliwości produkcyjnych zakładu CFT Precyzja Sp. z o.o.. Przedstawiono również wyniki badań balistycznych różnych konstrukcji wkładów balistycznych, dokumentujące przygotowanie końcowego produktu na poziomie VIII TRL. Do oceny zastosowanych materiałów i opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych wkładów balistycznych zastosowano przede wszystkim analityczne i doświadczalne metody badawcze.

Tematyka niniejszej dysertacji, jest rezultatem zarówno aktywności naukowej autora pracy jako doktoranta Wojskowej Akademii Technicznej, Wydziału Mechanicznego, ale również jako osoby odpowiedzialnej za funkcjonowanie przedsiębiorstwa w zakresie produkcji wyrobów o przeznaczeniu specjalnym oraz kierowaniem działem badawczo – rozwojowym firmy. Zaprezentowane w niniejszym opracowaniu treści wynikają przede wszystkim z doświadczenia zawodowego, jak również dotychczasowej drogi naukowej.

Ze względu na formułę „doktoratu wdrożeniowego” rozprawa nie jest typowym opracowaniem naukowym i częściowo przybrała ona formę raportu, który dokumentuje proces opracowania, badania i wdrażania nowego produktu, tj. personalnego wkładu balistycznego, do produkcji w firmie CFT Precyzja Sp. z o.o.

Głównym założeniem formuły „doktorat wdrożeniowy” jest przygotowanie rozprawy doktorskiej, zawierającą taką wiedzę naukową, która przyczyni się do lepszego funkcjonowania danego przedsiębiorstwa. Doktorat wdrożeniowy to także alternatywna droga uzyskania stopnia doktora przez osoby, które – chcąc rozwijać swoją karierę naukową – nie chcą rezygnować z pracy zawodowej poza uczelnią. Program został wprowadzony w 2017 r. Wspiera przygotowanie rozpraw doktorskich przez doktorantów, którzy pod opieką dwóch opiekunów – naukowego (przedstawiciel uczelni wyższej) i pomocniczego (przedstawiciel firmy zatrudniającej doktoranta), realizuje projekt doktorski na rzecz danej firmy [1].

CFT Precyzja Sp. z o. o., założona w 2004 roku w Czosnowie k/Warszawy, jest wysokospecjalistycznym podmiotem gospodarczym opracowującym i wytwarzającym innowacyjne produkty o przeznaczeniu militarnym, obronnym i policyjnym, takie jak m.in. nowoczesne osłony balistyczne. Spółka specjalizuje się w rozwijaniu nowatorskich technologii, kompleksowych systemów i rozwiązań w obszarze ochrony balistycznej środków transportu (pojazdów, statków powietrznych) oraz budynków i obiektów użyteczności publicznej. Wszystkie oferowane produkty posiadają certyfikacje krajowych i zagranicznych centrów badawczych, które spełniają wymagania norm polskich i międzynarodowych. CFT Precyzja jest ponadto profesjonalnym centrum świadczącym usługi precyzyjnej obróbki metali o wysokim stopniu zaawansowania technologicznego.

ROZDZIAŁ I

Analiza literaturowa

W rozdziale dokonano analizy literaturowej problematyki ochrony personalnej ze szczególnym zwróceniem uwagi na wkłady balistyczne używane w kamizelkach kuloodpornych. Przedstawiono zarys historyczny, rodzaje poziomów ochrony balistycznej i metody ich sprawdzenia, stosowane materiały oraz technologie wytwarzania konstrukcji kompozytowych. Przeanalizowano również zagadnienie ochrony balistycznej w kontekście przeżywalności, jak i opisane zostało zjawisko zatrzymania pocisku.

1.1. Zarys historyczny

Jak podają autorzy [2,3,4,5], pancerz kuloodporny to najważniejszy element wyposażenia ludzi chroniący przed różnymi krytycznymi i śmiertelnymi obrażeniami. Wśród różnych zagrożeń, oddziaływanie pocisku/odłamka jest jednym z najczęściej występujących. Uderzenie balistyczne jest stosunkowo złożonym procesem mechanicznym, który może wywoływać w celu/pancerzu szereg zjawisk fizycznych, prowadzących zazwyczaj do częściowego lub całkowitego zniszczenia osłony balistycznej. Pocisk amunicji strzeleckiej o stosunkowo małej masie i przyspieszony do dużej prędkości oddziałuje na cel w sposób skoncentrowany, wywołując zniszczenia zazwyczaj w pobliżu miejsca uderzenia. Bardzo ważnym aspektem ze względu na zrozumienie mechanizmów odpowiedzialnych za zdolność ochronną danej osłony balistycznej jest poznanie mechanizmów i rodzaju absorpcji energii kinetycznej pocisku w trakcie jego wnikania w pancerz i dystrybucji tej energii w materiałach składających się na daną osłonę balistyczną.

Rzeczony rozwój personalnych osłon balistycznych jest głównie determinowany zapotrzebowaniem ze strony wojska i policji, a kombinezony ochronne stopniowo są ulepszone poprzez stosowanie nowych rozwiązań konstrukcyjnych osłon i materiałów balistycznych. W tym miejscu należy podkreślić, że kamizelka kuloodporna nie tylko musi zapewniać możliwie jak najwyższy poziom ochrony balistycznej, ale być także lekka i elastyczna, aby nie ograniczać ruchów i nie obniżać w istotny stopniu komfortu użytkownika podczas jej noszenia [6].

Do produkcji pancerzy kuloodpornych stosowano różne materiały. Generalnie ewolucja historyczna kamizelek kuloodpornych ma bezpośredni związek ze zwiększaniem się siły

rażenia broni. Na przykład rozwój broni zdolnych do przyspieszania pocisków do dużych prędkości, a także postęp w produkcji wysoko energetycznych materiałów wybuchowych zmieniły dynamikę pola bitwy, która wymusiła opracowanie nowych systemów ochrony balistycznej, które powinny być tanie, odporne na uszkodzenia, elastyczne, lekkie i wygodne w noszeniu, a przede wszystkim posiadać wysoką zdolność do pochłaniania energii mechanicznej [7].

Od początków XIX wieku do I wojny światowej na osłony balistyczne stosowano głównie materiały metalowe w celu zapewnienia różnych poziomów ochrony. Na przykład w 1879 r. opracowany w Australii kombinezon/pancerz ważący 44 kg był wykonany głównie z połączonych ze sobą stalowych płyt, chroniących górne części tułowia, ramion oraz nóg. Z kolei w USA opracowano podczas I Wojny Światowej różne kamizelki kuloodporne z twardą płytą chroniącą klatkę piersiową i systemy ochrony głowy [2].

Pierwsza „miękką” kamizelka kuloodporna została wynaleziona w Korei około 1860 roku i była zbudowana z trzynastu warstw tkanin bawełnianych. Pomimo, że opracowana kamizelka nie odprowadzała dobrze ciepła i nie była komfortowa w noszeniu, a do tego łatwo ulegała zapaleniu od gorących odłamków pocisku, to jednak była uważana w tym czasie za skuteczną ochronę przed pociskami. W tamtym okresie podejmowano także próby z zastosowaniem jedwabiu. Opracowano m.in. miękką kamizelkę kuloodporną składającą się z od 18 do 30 warstw tkaniny jedwabnej, która miała zapewnić ochronę użytkownika przed penetracją pocisku w postaci strzały [8].

W początkowym okresie II Wojny Światowej, w USA podjęto próbę wprowadzenia do użytkowania sztywnej kamizelki kuloodpornej, ale szybko uznano ją za zbyt ciężką, niewygodną i ograniczającą mobilność żołnierzy. Czynniki te skłoniły do podjęcia prac nad elastyczną kamizelką kuloodporną, w której zastosowano nylonowe włókna syntetyczne (nylon 6.6). Chociaż materiał ten nie znalazł szerszego zastosowania w lekkich osłonach balistycznych, jednakże był on pierwszym syntetycznym włóknem stosowanym w systemach balistycznych w postaci elastycznych nakładek ze splotu koszowego. Nakładki te użyto do osłony górnej części klatki piersiowej i ramion, a płyty stalowe do ochrony klatki piersiowej [9].

Około 1970 roku firma DuPont wprowadziła na rynek aramidowe włókno syntetyczne, o nazwie handlowej - Kevlar, a już w 1976 r. opracowano pierwszą elastyczną balistyczną kamizelkę kuloodporną na bazie Kevlaru [10]. Był to przełom dla systemów ochrony personalnej. Od tego czasu rozwijane były kolejne nowe włókna takie, jak Dyneema firmy DSM, GoldFlex i Spectra firmy Honeywell, Twaron firmy Teijin oraz Zylon od Toyobo,

których zastosowanie spowodowało znaczącą poprawę właściwości ochronnych elastycznych kamizelek kuloodpornych [11].

W rozwoju kamizelek kuloodpornych swój udział mieli również Polacy. Zarówno Jan Szczepanik, jak i Kazimierz Żegleń uważali się za pierwszego wynalazcę kamizelki kuloodpornej. Kazimierz Żegleń jako pierwszy uzyskał patent (1896 r. i 1897 r.) oraz dokonywał publicznych demonstracji skuteczności kamizelki na kilka lat przed Szczepanikiem. Pierwsze publiczne pokazy swojej kuloodpornej tkaniny Kazimierz Żegleń przeprowadził z udziałem policji chicagowskiej 16 marca 1897 roku. 7 maja 1897 roku Kazimierz Żegleń zlecił firmie Szczepanika opracowanie technologii tkania maszynowego kamizelki kuloodpornej. Szczepanik znacząco ulepszył konstrukcje jedwabnej tkaniny kuloodpornej dzięki technice tkania wypukłych dywanów oraz dzięki swoim maszynom tkackim uzyskał materiał wyższej jakości niż Żegleń, który tkał materiał ręcznie [12].

Szczepanik – podobnie jak i Żegleń – do produkcji kamizelki kuloodpornej wykorzystał wielowarstwową tkaninę jedwabną „z cienkimi blaszkami stalowymi, utkaną w ten sposób, że amortyzowała wszelkie ciosy – wystrzelone pociski oraz pchnięcia i cięcia białą bronią”. Dzięki temu „pocisk przebijając kolejne warstwy, wikał się w sploty nici, przez co tracił szybkość i moc”. Pierwszą publiczną próbę kamizelki kuloodpornej Szczepanika przeprowadzono w 1901 roku. Odbyła się w Wiedniu, gdzie wynalazca miał wówczas pracownię. W teście uczestniczyli zaintrygowani przedstawiciele austriackich władz cywilnych i wojskowych [13].

1.2. Poziomy odporności balistycznych dla wkładów balistycznych ochrony personalnej

Analizę obecnego stanu wiedzy należy zacząć od dostępnych standardów klasyfikacji systemów ochrony personalnej. Najbardziej popularnym jest amerykańska norma NIJ 0101 wydana przez Narodowy Departament Sprawiedliwości (*ang. National Institute of Justice*) [14]. Najnowszą wersją tej normy jest NIJ 0101.06 (aczkolwiek trwają prace nad aktualizacją o oznaczeniu 0101.07). Najbardziej istotnym czynnikiem testowym dla oceny balistycznej kamizelek kuloodpornych jest brak penetracji oraz pomiar deformacji (BFS) podłoża, którym w większości przedmiotowych norm jest pomiar deformacji specjalnej plasteliny o ustalonych parametrach, które podlegają ocenie przed, w trakcie, jak również po wykonanym teście. W przypadku normy NIJ 0101.06 dopuszczalna zmierzona deformacja podłoża po ostrzale wkładu balistycznego wynosi 44 mm.

Stosowane są różne poziomy odporności balistycznej, które określają właściwości ochronne danej osłony balistycznej w zależności od kalibru i prędkości uderzenia. Zestawienie prezentujące poziomy balistyczne określone w normie NIJ 0101.06 oraz odpowiadające im warunki testów balistycznych i kryteria oceny odporności balistycznej zawarto w tabeli 1.1.

Tabela 1.1. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg NIJ 0101.06 [14]

Rodzaj Panczerza Armor Type	Kolejność badania Test Round	TEST VARIABLES				PERFORMANCE REQUIREMENTS			SHOT REQUIREMENTS					Total Shots Required
		Pocisk do badania Test Bullet	Masa pocisku Bullet Mass	Prędkość badania dla panczerza kondycjonowanego Conditioned Armor Test Velocity*	Prędkość badania dla panczerza nowego New Armor Test Velocity*	Hits Per Panel at 0° Angle	Maks. deformacja BFS Maximum Depth	Hits Per Panel at 30° or 45° Angle [†]	Ilość strzałów na panel Shots Per Panel	Rozmiar panelu Panel Size	Stan panelu Panel Condition	Ilość wymaganych paneli Panels Required	Ilość wymaganych strzałów Shots Required	
IIA	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	355 m/s (1165 ft/s)	373 m/s (1225 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	przy kącie 30° lub 45° 2	6	Large	New Conditioned	4	24	Calkowita liczba strzałów 144
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.40 S&W FMJ	11.7 g (180 gr)	325 m/s (1065 ft/s)	352 m/s (1155 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
II	1	9 mm FMJ RN	8.0 g (124 gr)	379 m/s (1245 ft/s)	398 m/s (1305 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	144
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.357 Magnum JSP	10.2 g (158 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
IIIA	1	.357 SIG FMJ FN	8.1 g (125 gr)	430 m/s (1410 ft/s)	448 m/s (1470 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	144
										Small	New Conditioned	2	12	
	2	.44 Magnum SJHP	15.6 g (240 gr)	408 m/s (1340 ft/s)	436 m/s (1430 ft/s)	4	44 mm (1.73 in)	2	6	Large	New Conditioned	4	24	
										Small	New Conditioned	2	12	
III	1	7.62 mm NATO FMJ	9.6 g (147 gr)	847 m/s (2780 ft/s)	-	6	44 mm (1.73 in)	0	6	All	Conditioned	4	24	24
IV	1	.30 Caliber M2 AP	10.8 g (166 gr)	878 m/s (2880 ft/s)	-	1 to 6	44 mm (1.73 in)	0	1 to 6	All	Conditioned	4 to 24	24	24
Special	-	Each test threat to be specified by armor manufacturer or procuring organization.				Armor performance and shot requirements shall depend on armor type.								

*Target measurement velocity. Fair hit measurement velocities must be within ± 9.1 m/s (± 30 ft/s) of this value, as defined in Section 7.6.

[†]Each armor that is to be shot at angles other than 0° shall be shot once at a 30° angle and once at a 45° angle.

W Polsce dostępną normą do stosowania w obszarze oceny wkładów balistycznych jest PN-V-87000, która dla określonego podłoża dopuszcza deformację (BFS) na poziomie nie większym niż 40 mm [15]. W przypadku polskiej normy, normy NIJ 0101.06, oraz innych stosowanych normach dla wkładów balistycznych, klasyfikację można wyróżnić ze względu na poziomy odporności balistycznej. Dodatkowo ze względu na specyfikę dostępności broni, polska norma uwzględnia ostrzał pociskami dostępnymi w Europie Środkowo – Wschodniej (patrz tabela 1.2). Należy jednak zaznaczyć, że norma ta została uzupełniona o specyfikację badań i wykaz poziomów odporności na odłamkoodporność. Ponadto, bazując na normie STANAG 2920, wprowadzono wymaganie odporności przeciw odłamkom standardowym FSP (ang. *Fragment Simulating Projectile*) o określonym kształcie i specyfikacji (patrz rys. 1.1) oraz o określonej prędkości uderzenia [16].

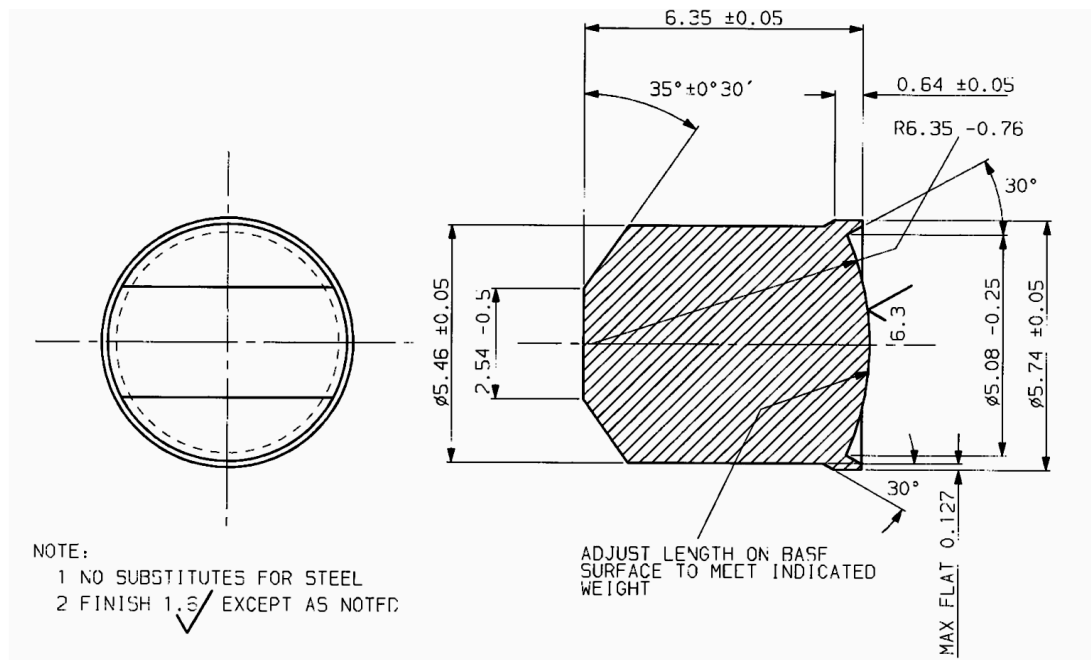
Tabela 1.2. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg PN-V-87000 [15]

Tablica 1 – Klasy i podklasy kuloodporności

Klasa	Podklasa	Amunicja	Typ pocisku	Masa Pocisku g	Prędkość mierzona m/s	Liczba trafień dla danego kąta uderzenia		Dopuszczalne wgniecenie (ugięcie) podłoża mm
						0 ± 5°	30 ± 5°	
K1	A	9x19 mm	FMJS	8,0 ± 0,1	365 ± 15	4	2	40
	B	9x19 mm	FMJS	8,0 ± 0,1	400 ± 15	4	2	40
K2		7,62 TT	FMJS	5,5 ± 0,1	420 ± 15	4	2	40
K3	A	7,62x39 mm	PS	7,9 ± 0,1	720 ± 15	6	0	40
	B	5,56x45 mm ^{a)}	SS109	4,0 ± 0,1	950 ± 15	6	0	40
	C	7,62x51 mm ^{b)}	FMJS	9,6 ± 0,1	840 ± 15	6	0	40
K4		7,62x39 mm	BZ	7,7 ± 0,1	735 ± 15	1	0	40
K5	A	7,62x51 mm ^{b)}	AP	9,7 ± 0,1	820 ± 15	1	0	40
	B	7,62x54 mm	B32	10,7 ± 0,1	860 ± 15	1	0	40
SPECJALNA		np.: .357 SIG, .40 S&W, .45 ACP, 5,7 x 28 mm				zależnie od zagrożenia		40
FMJS – pocisk z rdzeniem ołowianym i płaszczem wykonanym ze stali (K1, K3C) lub bimetalowym (K2) PS – pocisk z rdzeniem ze stali miękkiej i płaszczem wykonanym ze stopu miedzi SS109 – pocisk z rdzeniem ołowianym i penetratorem wykonanym ze stali miękkiej, o budowie według STANAG 4172 Ed.2 BZ – pocisk przeciwpancerno-zapalający z rdzeniem ze stali o twardości (62 ± 2) HRC AP – pocisk przeciwpancerny z rdzeniem ze stali o twardości (63 ± 2) HRC B32 – pocisk przeciwpancerno-zapalający z rdzeniem ze stali o twardości (63 ± 2) HRC								
UWAGA 1 Dopuszcza się przeprowadzenie badań zarówno przy użyciu łuf balistycznych jak i jednostek broni strzelających daną amunicją, przy zachowaniu parametru prędkości mierzonej.								
UWAGA 2 W celu potwierdzenia, czy kamizelka spełnia wymagania każdej z podklas, dla każdej podklasy przeprowadza się oddzielne badania								
^{a)} – lufa o skoku bruzd 178 mm ± 5 % ^{b)} – lufa o skoku bruzd 305 mm ± 5 %								

Tablica 2 – Klasy odłamkoodporności kamizelek

Klasa odłamkoodporności kamizelki	Masa odłamka g	Granica ochrony balistycznej V50 m/s
O1	1,10	450 ≤ V50 < 525
O2		525 ≤ V50 < 600
O3	±	600 ≤ V50 < 675
O4	0,03	675 ≤ V50



Rys. 1.1. Odłamek kalibru .22 – 1.1g (do ostrzału bez sabotu)[16]

Wymienić należy jeszcze inne popularne normy stosowane do oceny systemów kamizelek kuloodpornych, takie jak np. brytyjską HOSDB Body Armor Standards (2007) (patrz tabela 1.3.) [17], niemieckie Technische Richtlinie March 2008 (patrz tabela 1.4.) [18] oraz VPAM 2006 (patrz tabela 1.5.) [19], rosyjską GOST R 50744-95 (patrz tabela 1.6.) [20] oraz chińską GA141-2010 (patrz tabela 1.7.) [21].

Tabela 1.3. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg HOSDB Body Armor Standards (2007) UK [22]

Rodzaj pancerza Armor Type	Amunicja Test-Bullet	Producent amunicji Bullet-Producer	Masa pocisku Bullet-Weight [g] [gr.]	Prędkość pocisku Bullet-Velocity [m/s] [ft/s]	Odległość Distance [m]	Maks. deformacja Max. BFD UDL [mm]	Ilość testowanych paneli No. of vest panels	Ilość strzałów na panel No. of shots per panel	Kąt ostrzału Shooting Angle [° Nato]	Dopasowanie tak/nie Padding down yes/no
HG1/A	9 mm FMJ	DM 11 A1B2 Dyn. Nobel	8.0 124	365 ± 10	5	44	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
	.357 Mag. JSP	R357M3 Remington	10.2 158	390 ± 10	5	44	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
HG1	9 mm FMJ	DM 11 A1B2 Dyn. Nobel	8.0 124	365 ± 10	5	25	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
	.357 Mag. JSP	R357M3 Remington	10.2 158	390 ± 10	5	25	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
HG2	9 mm FMJ	DM 11 A1B2 Dyn. Nobel	8.0 124	430 ± 10	5	25	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
	.357 Mag. JSP	R357M3 Remington	10.2 158	455 ± 10	5	25	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
HG3	Carbine 5.56x45 Nato	Federal Tactical Bonded	4.01 62	750 ± 15	10	25	2x Size S 3x Size M 1x Size L	3 6 6	45°, 0°, 0° 6x 0° 45°, 3x 0°, 45°, 0°	Yes
RF1	Rifle 7.62 mm Calibre	BAE Systems Nato Ball L2 A2	9.3 144	830 ± 15	10	25	2	3	0°	no
RF2	Rifle 7.62 mm Calibre	BAE Systems Nato Ball L40A1	9.7	850 ± 15	10	25	2	3	0°	no
SG1	Shotgun 12 gauge True cylinder	Winchester 1 oz. Rifled Lead Slug 12RS15 or 12RSE	28.4 437	435 ± 25	10	25	2	1	0°	-

Tabela 1.4. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg Techniche Richtlinie March 2008 [22]

Klasa Class	Amunicja Test-Bullet	Producent amunicji Bullet-Producer	Masa pocisku Bullet-Weight [g]	Prędkość pocisku Bullet-Velocity [m/s]	Odległość Distance [m]	Liczba strzałów prowadzona w następujących warunkach na każdy panel No. of shots performed under following conditions 1 panel for each kind of test					
						0°	65°	0° contact shot	0° climat.	0° -20°C	0° +70°C
SK L	9mm Luger FMJ/RN/SC, tinned	DAG, DM41	8.0 ± 0.1	360 ± 10	5 ± 0.5	3+1	3	3	3	3	3
SK L	9mm Luger FMJ/RN/SC, tinned	DAG, DM41	8.0 ± 0.1	415 ± 10	5 ± 0.5	3+1	3	3	3	3	3
	9 x 19 QD-PEP II/S	MEN	6.0 ± 0.1	460 ± 10	5 ± 0.5		3	3			
	9 x 19 Action 4	RUAG	6.1 ± 0.1	460 ± 10	5 ± 0.5		3	3			
SK 2	.357 Mag FMs/CB	DAG, Special	7.1 ± 0.1	580 ± 10	5 ± 0.5	3	3		3	3	3
SK 3	223 Rem FMJ/PB/SCP	MEN, SS 109	4.0 ± 0.1	950 ± 10	10 ± 0.5	3	3		3	3	3
	308 Win. FMJ/PB/SC	MEN, DM 111	9.55 ± 0.1	830 ± 10	10 ± 0.5	3	3		3	3	3
SK 4	308 Win. FMJ/PB/HC	FNB or CBC-MEN, P 80	9.7 ± 0.2	820 ± 10	10 ± 0.5	3	3		3	3	3

Tabela 1.5. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg VPAM 2006 [22]

Kontrolowany poziom Inspection Level	Amunicja Ammunition			Odległość Distance	Prędkość pocisku Bullet velocity [m/s]	Liczba strzałów prowadzona w następujących No. of shots performed under the following conditions							
	Pocisk testowy Test-Bullet	Masa pocisku Bullet weight [g]	Producent pocisku Bullet producer			0	65°	0° / contact shot	0°	0°	0°	V50	
								optional					
						+20°C	+20°C	+20°C	+40°C climat	-20°C	+70°C		
1	22 Long rie	L/RN	2.6 ± 0.1	Winchester	10 + 0.5	360 ± 10	3+1	3	3	3	3	3	yes
2	9mm Luger	FMJ/RN/SC; tinned	8.0 ± 0.1	DAG, DM 41	5 + 0.5	360 ± 10	3+1	3	3	3	3	3	yes
3	9mm Luger	FMJ/RN/SC; tinned	8.0 ± 0.1	DAG, DM 41	5 + 0.5	415 ± 10	3+1	3	3	3	3	3	yes
4	.357 Mag.	FMJ/CB/SC	10.2 ± 0.1	Geco	5 + 0.5	430 ± 10	3	3	-	3	3	3	
	.44 Rem. Mag.	FMJ/FN/SC	15.6 ± 0.1	Speer	5 + 0.5	440 ± 10	3	3	-	3	3	3	
5	.357 Mag.	FMs/CB	7.1 ± 0.1	DAG, Special	5 + 0.5	580 ± 10	3	3	-	3	3	3	
6	7.62 x 39	FMJ/PB/FeC	8.0 ± 0.1	PS	10 + 0.5	720 ± 10	3	3	-	3	3	3	
7	223 Rem	FMJ/PB/SCP	4.0 ± 0.1	MEN, S5 109	10 + 0.5	950 ± 10	3	3	-	3	3	3	
8	7.62 x 39	FMJ/PB/HCI	7.7 ± 0.1	BZ	10 + 0.5	740 ± 10	3	3	-	3	3	3	
9	308 Win.	FMJ/PB/HC	9.45 ± 0.1	FNB, P 80	10 + 0.5	820 ± 10	3	3	-	3	3	3	
10	7.62 x 54 R	FMJ/PB/HCI	10.4 ± 0.1	B32	10 + 0.5	860 ± 10	3	3	-	3	3	3	
11	308 Win.	FMJ/PB/WC	8.4 ± 0.1	Nammo, AP 8	10 + 0.5	930 ± 10	3	3	-	3	3	3	
12	308 Win.	FMJ/PB/WC	12.7 ± 0.1	SWISS P AP	10 + 0.5	810 ± 10	3	3	-	3	3	3	
13	50 Browning	FMJ/PB/HC	43.0 ± 0.5	SWISS P Penetrator	-	930 ± 20	3	3	-	3	3	3	
14	14.5 x 114	FMJ/PB/HCI	63.4 ± 0.5	B32	-	911 ± 20	3	3	-	3	3	3	

Tabela 1.6. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg GOST R 50744-95 [22]

Klasa Class	Typ broni Type of Weapon	Kaliber Calibre [mm]	Amunicja Ammunition		Warunki testu Test Conditions		
			Typ Type	Masa Mass [g]	Odległość ostrzału Shot Distance [m]	Prędkość pocisku Bullet Velocity 1) [m/s]	Maks. deformacja Max. BFD [mm]
Special class Klasa specjalne							
S	Knife	-	-	-	-	49 ± 1 Joule	-
S1	Hunting Rie	18.5	Leadcore	34.0 ± 1.0	5 ± 0.5	400 ± 10	17
S2	FSP	-	Steel sphere Ø 6.35 mm	1.05	-	V 50% ²)	-
Main class Klasa główna							
BR1	9mm APS	9x18	Hardened Fe Core 7N21	5.9	5 ± 0.1	455 ± 10	17
BR2	SR-1 Vector	9x21	Lead Core, 7N28	7.93	5 ± 0.1	390 ± 10	17
BR3	Jarygin PJa	9x19	Hardened Fe Core, 7N21	5.2	5 ± 0.1	455 ± 10	17
BR4	AK74	5.45x39	Hardened Fe Core, 7N10	3.5	10 ± 0.1	895 ± 15	-
	AKM	7.62x39	Mild Steel Core, 57N231	7.9	10 ± 0.1	720 ± 15	-
BR5	Dragunov SVD	7.62x54	Hardened Fe Core (PP), 7N13	9.4	10 ± 0.1	830 ± 15	-
	Dragunov SVD	7.62x54	Armor Piercing (API), 7BZ3	7.9	10 ± 0.1	810 ± 15	-
BR6	OSW-96	12.7x108	Armor Piercing (API), 57BZ542	48.2	50 ± 0.5	830 ± 20	-

Tabela 1.7. Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg GA141-2010 [22]

Klasa Class	Amunicja testowa Bullet Test	Masa pocisku Bullet Weight [g]	Odległość ostrzału Shooting Distance [m]	Prędkość pocisku Bullet Velocity [m/s]	Warunki testu Test Condition	Sposób prowadzenia testu Performance				Liczba strzałów/ Liczba paneli No. of shots/ No. of plates
						Liczba strzałów No. of shots at 0° angle single	Liczba strzałów 30° i 45° No. of shots 30° & 45° angle	Maks. deformacja Max.BFD [mm]	Liczba strzałów Liczba paneli No. of shots/ No. of vest panels	
1	7.6 x 25 (64 type) SC FMJ RN	4.87	5	320±10	New bullet-proof vest	4	2	25	12/2	-
					Environmental test	3	0		24/8	-
2	7.3.62 x 25 SC FMJ RN (P54 51 type)	5.6	5	445±10	New bullet-proof vest	4	2	25	12/2	-
					Environmental test	3	0		24/8	-
3	7.62 x 25 SC FMJ RN (M79 51 type)	5.6	5	515±10	New bullet-proof vest	4	2	25	12/2	-
					Environmental test	3	0		24/8	-
4	7.62 x 25 HC FMJ RN (M79 51 type)	5.68	15	515±10	New bullet-proof vest	6	0	25	-	6/1
					Environmental test	3	0		-	12/4
5	7.62 x 39 HC FMJ PB (56 type)	8.05	15	725±10	New bullet-proof vest	6	0	25	-	6/1
					Environmental test	3	0		-	12/4
6	7.62 x 54 HC FMJ PB (56 type)	9.6	15	830±10	New inserted plate	2	0	25	-	2/1

W powyższych normach znajdziemy klasyfikację wkładów balistycznych ze względu na ich przeznaczenie i poziom odporności balistycznej. Wkłady miękkie służą do ochrony przed pociskami pistoletowymi i mają zastosowanie w elastycznych i lekkich kamizelkach taktycznych oraz w celu ochrony osób szczególnie ważnych (VIP). Wkłady twarde natomiast, stosowane w kamizelkach taktycznych oraz osłonach typu Plate Carrier, przeznaczone są do ochrony przed pociskami naboju karabinowych (w tym przeciwpancernymi). Wkłady twarde klasyfikuje się dodatkowo na dwa typy systemów tj. „Stand Alone (SA)” jako samonośne płyty spełniające wymogi odporności balistycznej oraz „In Conjunction With (ICW)” czyli płyty ochronne spełniające wymaganą odporność balistyczną wyłącznie z dedykowanym miękkim wkładem balistycznym pod spodem.

1.3. Metody badań systemów balistycznych

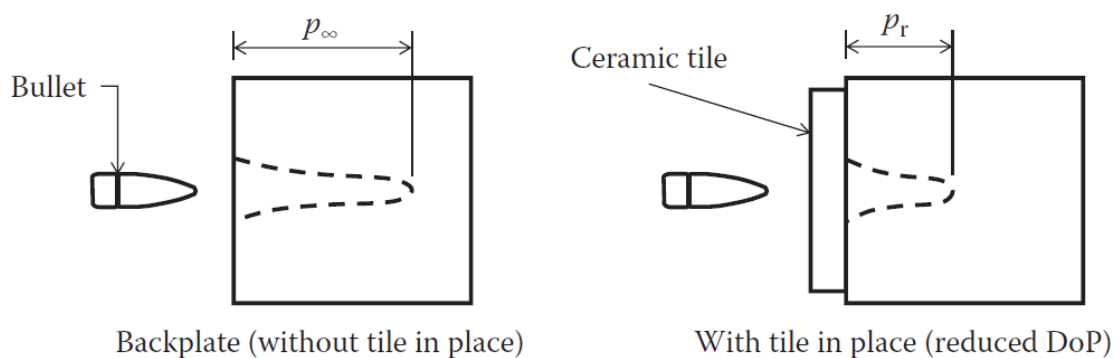
Poza metodami weryfikacji poziomów balistycznych przytoczonych w poprzednim podrozdziale istnieją jeszcze alternatywne metody badań określonych struktur.

Poniżej przedstawiono inne techniki badawcze stosowane do oceny właściwości balistycznych:

- **Test głębokości penetracji (DOP, *Depth-of-Penetration Testing*)**

Polega on na ostrzale modelowym lub bojowym pociskiem płytki (próbki) pancerza przymocowanej do miękkiego materiału podkładowego (np. miękka stal), a następnie pomiarze wynikowej głębokości penetracji (DoP) w płycie podkładowej i porównaniu tej wartości z wartością głębokości penetracji w płycie nieosłoniętej próbką pancerza (rys. 1.2). Technika DoP została pierwotnie opracowana przez Rosenberga (1988, 1990). W ciągu ostatnich 20 lat

przeprowadzono wiele badań, w których wykorzystano tę technikę do zbadania reakcji materiałów docelowych na pociski z broni strzeleckiej. Zaletą tej metody jest to, że ustalenie kryteriów ochronnych dla danej płytki pancerza jest stosunkowo tanie. Wadą natomiast jest to, że płyta podkładowa nie jest reprezentatywna dla typowych systemów pancerzy, a zatem wynik badania polega tylko i wyłącznie na ocenie porównawczej badanych systemów ochronnych [23].



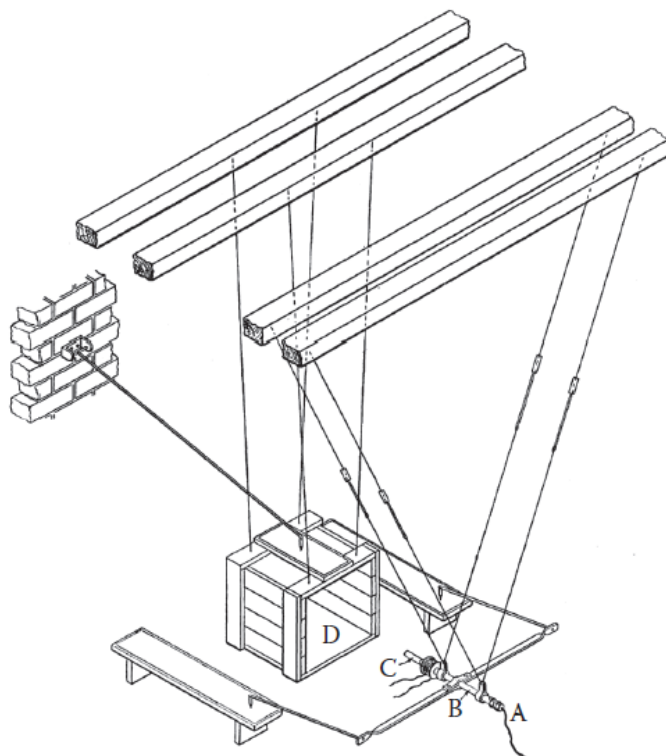
Rys. 1.2. Schematyczna ilustracja testu DoP [23]

- **Test granicznej odporności balistycznej (V_{50}) [24]**

Badanie to polega na wyznaczeniu, tzw. granicznej odporności balistycznej, którą wyraża się za pomocą wartości charakterystycznej prędkości pocisku oznaczona symbolem V_{50} . Prędkość ta to prędkość uderzenia pocisku, przy której oczekuje się, że 50% pocisków zostanie zatrzymanych przez badaną osłonę (brak perforacji), a 50% pocisków spowoduje częściową lub całkowitą perforację. Zaletą techniki V_{50} w porównaniu z techniką testu DoP jest to, że testowany jest cały system balistyczny, a nie element systemu (tj. np. ceramiczna płytka). Ponadto, zaletą testu V_{50} jest to, że uwzględnia on losowość zjawisk zachodzących podczas penetracji osłony, tj. dla danego pancerza będzie istniał zakres mieszanych wyników w stosunkowo wąskim zakresie prędkości uderzenia pocisku. Szczegółowa metodyka granicznej odporności balistycznej została przedstawiona w normie STANAG 2920 [7].

- **Test z użyciem wahadła balistycznego**

Wahadło balistyczne to urządzenie, które znajduje się za celem i mierzy pęd pocisku, który uderzył w cel i go sperforsował. Historycznie, wahadło balistyczne było pierwszą metodą pomiaru energii pocisku uderzającego w cel. Ideę tej techniki pomiarowej po raz pierwszy zaproponował B. Hopkinson w 1914 roku (Rys. 1.3). Przy znanej masie zawieszony na linie o znanej długości, mierzy się jej wychylenie po uderzeniu pocisku, które to wychylenie jest miarą energii pochłoniętej przez pancerz [25].

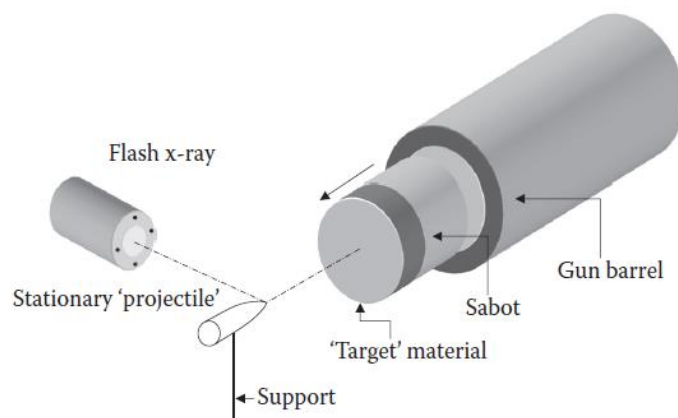


Rys. 1.3. Schemat układu badawczego B. Hopkinsona w postaci wahadła balistycznego [25].

- **Odwrotny test balistyczny [26]**

W zastosowaniu tej metody „cel” jest przyspieszany w kierunku nieruchomego „pocisku”. Oczywiście definicja celu jest odwrócona i teraz pocisk, który zostałby wystrzelony w eksperymentach balistycznych do przodu, staje się celem. Zastosowanie odwróconego testu balistycznego służy do badania mechanizmów – w szczególności zniszczenia i zmian zachodzących w pocisku. Test ten jest również wykorzystywany do badania wpływu materiałów stosowanych w kamizelkach kuloodpornych na ich odporność balistyczną. Do zalet tej metody można zaliczyć:

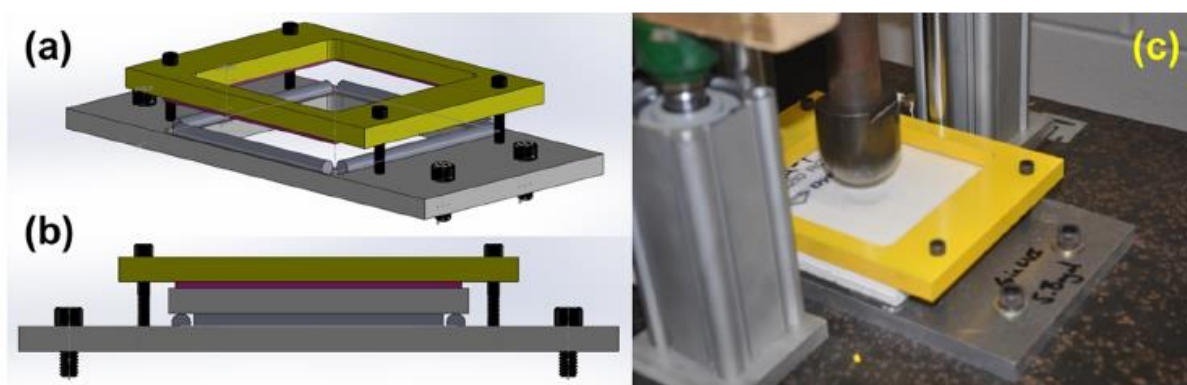
- (1) możliwość przeprowadzania eksperymentów w warunkach laboratoryjnych z wykorzystaniem dział gazowych dużego kalibru.
- (2) łatwość ustawienia i przygotowania celu w dokładnie zdefiniowanej orientacji [24].



Rys. 1.4. Schemat układu badawczego odwrotnego testu balistycznego [24]

- **Metodyka testu spadowego**

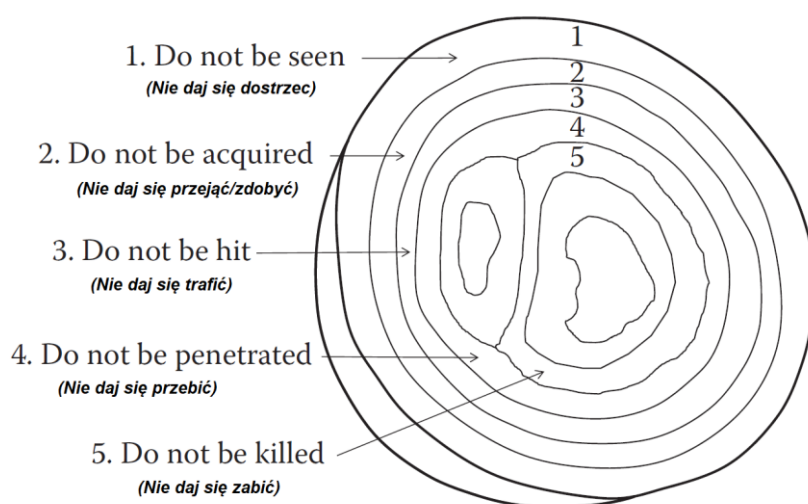
W swoim artykule Jeffrey M. Staniszewski [27] wykorzystuje mechanikę laminatu do określenia nieliniowości materiału na poziomie warstwy i reorientacji włókien wywołanej odkształceniem laminatów kompozytowych UHMWPE poddanych uderzeniu z małą prędkością LVI (*ang. Low-velocity impact*). Autor wykorzystuje założoną procedurę badawczą w celu opracowania narzędzia programistycznego do modelowania struktur ochrony balistycznej oraz walidacji przyjętego modelu do analiz metodą elementów skończonych. Przy użyciu wieży do testów spadowych oraz kamery ultraszybkiej weryfikuje się odkształcalność włókien wyrażona wielkością odkształcenia tylnej strony próbki BFD (*ang. Back-face deflection*). Na rysunku 1.5., możemy zauważyć, że został opracowany specjalny układ montowania próbek, który ma za zadanie zniwelować wpływ miejsc mocowania.



Rys. 1.5. Układ do badań udarowych o niskiej prędkości z swobodnie podpartymi warunkami brzegowymi do płaskich paneli UHMWPE. Schemat mocowania (a) bez próbki, (b) widok z boku z próbką i (c) na miejscu na wieży do obciążników Dyantup z zamocowaną próbką i penetratorem kulistym o średnicy 5,1 cm [27]

1.4. Istota odporności balistycznej osłony personalnej

Zagadnienie odporności balistycznej jest w dzisiejszych czasach szczególnie ważne, kiedy to do czynienia mamy z atakami terrorystycznymi, zagrożeniem wojną jak również wysoce zorganizowaną przestępczością. Przyjmując koncepcję wielowarstwowości ochrony tzw. „cebula przeżywalności” (ang. „*survivability onion*”) (patrz rys. 1.6) przedstawioną w książce P. Hazzel [24], należy przyjąć, że ochrona personalna w postaci kamizelek kuloodpornych stanowi ostatnie z przedstawionych grup przeżywalności w sytuacji zagrożenia ostrzałem.



Rys. 1.6. Wielowarstwowe podejście do przeżywalności [24]

Według tej struktury założenie jest następujące: Nie daj się dostrzec, jeżeli Cię dostrzeżono to nie daj się przejąć, jeżeli zostałeś przejęty to nie daj się trafić, jeżeli zostałeś trafiony to nie daj się przebić, jeżeli już zostałeś przebity to nie daj się zabić.

Koncepcja ta pokazuje, że kamizelka kuloodporna ma za zadanie nie pozwolić pociskom przebić się w obszarze istotnych narządów człowieka i w przypadku takiego trafienia ograniczyć śmiertelność. Koncepcja ta ilustruje również to, że kamizelka może wpływać na wyższe warstwy przeżywalności. System ochrony personalnej musi umożliwiać wysoką mobilność poprzez możliwie małą masę oraz odpowiednio dopasowany kształt. Nie należy także zapominać o ograniczeniu widzialności przez przeciwnika, w tym przypadku przez ograniczenie jaskrawych kolorów kamizelki oraz zastosowanie kamuflażu maskującego.

1.5. Konstrukcje i materiały stosowane na systemy osłon balistycznych

Jakość i trendy rozwojowe nowoczesnych środków ochrony personalnej wyznaczają takie parametry, jak masa i poziom odporności balistycznej, które są bezpośrednio zależne od materiałów użytych do wytworzenia danego rozwiązania. Obecnie odchodzi się już od rozwiązań paneli ochronnych wykonywanych ze stali pancernych, ze względu na dużą masę systemu ochrony oraz duże ryzyko odłamków generowanych przez rozpadający się pocisk. Najbardziej perspektywicznym źródłem materiałów są materiały z rynku kompozytów, a dokładniej wszelkiego rodzaju materiały włókniste na bazie aramidu, polietylenu itp. [28].

Wybór tych materiałów nie jest przypadkowy, jak podaje w swojej książce Radziszewski L. [28]. Do najbardziej znanych klas polimerów ciekłokrystalicznych można zaliczyć głównie łańcuchowe poliestry i poliamidy. Poliamidy to polimery, które posiadają wiązania amidowe $-CO-NH-$ w swoich głównych łańcuchach. Poliamidy mają dużą zdolność do krystalizacji, którą dodatkowo wzmacnia tworzenie się wiązań wodorowych między atomem tlenu i azotu z dwóch różnych grup amidowych. Dzięki temu poliamidy są bardziej twarde i trudniej topliwe niż poliestry, nie mówiąc już o polimerach winylowych. Z poliamidów produkuje się przede wszystkim włókna nylonowe lub aramidowe. Aramidy, a właściwie poliamidy aromatyczne odróżnia od innych poliamidów, np. nylonu, występowanie w ich łańcuchach głównych ugrupowań aromatycznych. Niektóre aramidy zawierają między wiązaniami amidowymi tylko grupy aromatyczne, inne zaś zawierają też ugrupowania alifatyczne. Czym więcej w jego strukturze ugrupowań aromatycznych, tym większa odporność mechaniczna i termiczna, ale spada też rozpuszczalność, co powoduje wzrost trudności przy przetwarzaniu. Dużą wytrzymałość na rozciąganie włókien aramidowych spowodowana jest tym, że po pierwsze następujące po sobie ugrupowania aromatyczne i wiązania amidowe tworzą strukturę o dużej sztywności, ze względu na delokalizację elektronów z orbitali π układów aromatycznych na wiązania amidowe. Po drugie sztywne łańcuchy polimeru łatwiej krystalizują i łatwiej porządkują się w trakcie przedzenia, dzięki czemu otrzymane włókna posiadają wysoce uporządkowaną, kierunkową mikrostrukturę.

Z włókien aramidowych wytwarzane są, np.: kamizelki kuloodporne i hełmy, ubrania ochronne dla strażaków, lotników, kierowców rajdowych i astronautów, maszty jachtów oraz różne elementy sprzętu sportowego [28]. Polimery te stosuje się też w postaci cienkich folii, które wprasowuje się między inne materiały, tworząc laminaty o dużej wytrzymałości mechanicznej. Do najbardziej znanych typów włókien aramidowych zalicza się:

- poli-1,4-fenyloamid (poliparafenylenotereftalamid) tzw. KEVLAR® firmy DuPont, [29]
- poli-1,3-fenyloamid,
- kopolimer – poli-1,3-fenyloamid – co 1,4-fenyloamid tzw. TWARON® firmy Teijin [30].

Włókno z KEVLARU® składa się z długich łańcuchów polimerów równoległych do siebie. Wytrzymałość włókien z KEVLARU® wynika z silnych międzycząsteczkowych wiązań wodorowych oraz oddziaływań pomiędzy grupami aromatycznymi w sąsiednich włóknach. Taki rodzaj oddziaływań jest znacznie mocniejszy niż siły van der Waalsa występujące w innych polimerach, np. we włóknach typu DYNEEMA® [31]. Molekuły KEVLARU® mają grupy polarne zdolne do przyłączania wodoru. Cząsteczki wody, które dyfundują do wnętrza włókna mogą zająć miejsca połączeń pomiędzy molekułami, co osłabia materiał, podczas gdy dostępne grupy na powierzchni prowadzą do dobrej zwilżalności. Główną wadą KEVLARU® jest to, że ulega rozkładowi w środowisku alkalicznym, a także gdy działają na niego chlorki. Ulega on także degradacji pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. Zaletą włókien aramidowych jest dobra relacja wytrzymałości włókien do ich masy oraz duży moduł Young'a, dobre własności dielektryczne i antymagnetyczne, wysoka – około 823 K temperatura topnienia [28].

W środkach ochrony indywidualnej stosowane jest też włókno syntetyczne, tzw. DYNEEMA®, należące do grupy polietylenów o bardzo ciężkich cząsteczkach. Włókno to w skali przemysłowej jest produkowane od 1990 roku przez koncern DSM z Holandii. W Japonii włókno to produkuje firma Toyoto, a w USA firma Honeywell (wcześniej Allied Signal). Niezależnie od Holendrów firma ta produkuje też własne, identyczne chemicznie włókno pod nazwą SPECTRA®. Wytrzymałość włókien DYNEEMA® wynika ze stosunkowo długich pojedynczych cząsteczek (znacznie dłuższych niż w KEVLARZE®). We włóknach tych cząsteczki mogą uzyskać stopień równoległości większy niż 95% i stopień krystaliczności do 85%. Punkt topnienia włókien DYNEEMA® wynosi od 417 K do 425 K i nie jest zalecane używanie ich przez dłuższy czas w temperaturze przekraczającej 353 K. Włókna te stają się sztywne w temperaturze poniżej 123 K. Włókna te są tak śliskie, że utrudnia to ich stosowanie, nadto odkształcają się plastycznie przy każdym naprężeniu – pełzają. Są one odporne na wodę, większość substancji chemicznych, promieniowanie ultrafioletowe i mikroorganizmy [28].

1.6. Mechanizm absorpcji energii kinetycznej pocisku

Głównym zadaniem kamizelki kuloodpornej jest wyhamowanie pocisku na stosunkowo krótkim dystansie. W trakcie tego procesu kształt części wierzchołkowej pocisku ulega

zazwyczaj zmianie – przyjmuje najczęściej postać kapelusza grzyba. Jeżeli kamizelka nie zdoła zatrzymać tak zdeformowanego pocisku, to wniknie on do organizmu. Zadanie kamizelki kuloodpornej nie sprowadza się jedynie do uniemożliwienia pociskowi penetracji w żywym organizmie. Pocisk penetrujący kamizelkę powoduje w pewnym obszarze wokół miejsca uderzenia, odkształcenia i przemieszczenia materiału kamizelki wzdłuż trajektorii ruchu pocisku. W ten sposób pocisk oddziałuje (za pośrednictwem kamizelki) dynamicznie na żywy organizm użytkownika [28].

Z tego względu konstruktorzy kamizelek dążą do zmniejszenia omawianego przemieszczenia, stosując w tym celu różne sztywne płyty, tzw. amortyzatory lub absorbery uderzenia [32]. Należy pamiętać, że amortyzatory te nie są w stanie zatrzymać pocisku i muszą być używane zawsze razem z wkładem balistycznym. Tkanina kuloodporna pod względem budowy geometrycznej jest podobna do sieci wykonanej z bardzo mocnych nici. Mankamentem wkładów balistycznych tkanych jest to, że miejsca skrzyżowania włókien tkaniny po uderzeniu pocisku działają jako punkty koncentracji naprężenia i dlatego w tych miejscach włókna rozrywają się najłatwiej. Ilość warstw tkaniny lub preimpregnatów we wkładzie balistycznym jest ważnym parametrem decydującym o jego masie powierzchniowej i klasie kuloodporności kamizelki. Nie jest to jednak decydujące kryterium. Dopiero wtedy, gdy znamy rodzaj zastosowanego włókna i właściwości mechaniczne, jego zalety i wady, to możemy ocenić zdolności ochronne kamizelki [28].

Pocisk pistoletowy (o niezbyt ostrej części głowicowej, z miękkiego materiału) uderzając w żywy organizm w większym stopniu miażdży i rozrywa tkankę, niż ją tnie, czy rozsuwa. Postawienie na drodze pocisku materiału sprężystego o stosunkowo wysokiej wytrzymałości na rozciąganie stwarza szansę na zatrzymanie pocisku i niedopuszczenie do dalszej penetracji w tkanki organizmu. Materiał ten powinien dodatkowo odkształcić pocisk, powiększając jego średnicę, zmniejszyć i rozłożyć jego energię kinetyczną na możliwie dużą powierzchnię. Uderzając w tekstylny wkład balistyczny, pocisk rozrywa pierwsze jego warstwy, ale traci przy tym znaczną część swojej energii kinetycznej zużytej właśnie na rozerwanie wytrzymałych włókien [28]. Pozostała część energii kinetycznej pocisku przejmowana jest przez całą sieć włókien, które naprężając się i odkształcając się na znacznie większym obszarze niż obszar trafienia, przejmują energię pocisku i obniżają jego prędkość do zera [33]. Podczas tej fazy oddziaływania, pocisk pistoletowy ulega silnemu spłaszczeniu w trakcie tego procesu (zwłaszcza jego część głowicowa). Zjawisko to nazywane jest grzybkowaniem pocisku (patrz rys. 1.7) [34].



Rys. 1.7. Pocisk, który uległ tzw. grzybkowaniu podczas penetracji miękkiego wkładu aramidowego [22]

W miarę przebijania kolejnych warstw, coraz mniejsza energia pocisku rozkłada się na większą powierzchnię, aż w końcu staje się niewystarczająca do rozerwania włókien w kolejnych warstwach. Nawet nie mogąc rozerwać kolejnych warstw wkładu balistycznego, pocisk dalej przemieszcza się. Jego energia jest jeszcze wystarczająco duża, aby zadać ciężkie obrażenia (zmiżdżenie mięśni, złamanie kości), a przy szczególnie niekorzystnych okolicznościach nawet śmiertelne obrażenia (pęknięcie organów wewnętrznych, złamanie kręgosłupa) [28, 35]. Wobec tego istotną rolą kamizelki kuloodpornej jest również pochłonięcie znacznej części energii uderzenia pocisku i rozłożenie jej na możliwie dużej powierzchni, zmniejszając w ten sposób ugięcie kamizelki. Takie rozwiązania sprawdzają się, gdy trzeba zatrzymać pocisk wystrzelony z pistoletu lub rewolweru o stosunkowo dużym kalibrze, a małej energii kinetycznej. W przypadku ochrony przed pociskami nabojów PDW (*ang. personal defence weapon*), pośrednich lub karabinowych, należy zastosować kamizelki o nieco innej budowie, tzw. hybrydowe [36]. Energia kinetyczna tych pocisków może być znacznie większa od energii pocisków pistoletowych, natomiast kaliber często jest mniejszy od kalibru pocisków pistoletowych, a część głowicowa jest o kształcie ostrołuku. Rdzeń pocisków jest wykonywany ze stali otoczonej ołowianym wypełnieniem i mosiężnym lub stalowym płaszczem. Zatrzymanie takiego pocisku jest znacznie trudniejsze i gdyby podjęto próbę opracowania osłony balistycznej, bazując jedynie tekstylnym wkładzie balistycznym, to tak ukształtowana kamizelka okazałaby się zbyt gruba i niewygodna, a także niewiele więcej skuteczna. Aby znacząco zmniejszyć energię kinetyczną pocisku i rozłożyć ją na możliwe jak

największą powierzchnię, należy dodatkowo zastosować twardą płytę o wymiarach około 254×300 mm, na przykład z wysokowytrzymałej stali pancernej lub stopu tytanu o grubości od 3 do 7 mm, lub ceramiki o grubości od 13 do 17 mm, czy polietylenu o grubości około 25 mm [28].

Uderzając w twardą, lecz kruchą płytę z ceramiki, pocisk niszczy ją, ulegając jednocześnie dużym odkształceniom i zniszczeniom w swojej części głowicowej. Płytki ceramiczne (Al_2O_3 , SiC, B_4C , Ti_3SiC_2) rozpraszają energię pocisków, ale same szybko ulegają uszkodzeniu, a po wielokrotnych trafieniach – kruszą się i pękają. Gdy pocisk uderza w płytę ceramiczną z prędkością z zakresu średnich prędkości uderzenia (500-1000 m/s), wyróżnić można cztery fazy: (1) zetknięcie pocisku z powierzchnią płytki ceramicznej i hydrodynamiczne płnięcie pocisku i ceramiki: (2) pękanie i fragmentacja pocisku i ceramiki, a następnie (3) dalsze płnięcie materiału pocisku i fragmentów spękaną ceramiką przemieszczających się z dużą prędkością oraz (4) tworzenia się spękań w tylnej części ceramiki na skutek działania naprężenia rozciągającego, erozja pocisku i rozległe spękanie materiału ceramicznego [37]. Z kolei dalsze warstwy kompozytu w postaci laminatu z tkanin nie pozwalają płycie ceramicznej się rozpaść i jednocześnie hamują pocisk, jak i odłamki pocisku i ceramiki, które same zamieniają się w pociski wtórne. Dodatkową zaletą płyt kompozytowych w porównaniu ze stalowymi jest znacznie mniejsza masa przy porównywalnych właściwościach odporności balistycznych (ochronnych). Po przebicciu twardej płyty pancernej (metalowej lub ceramicznej) pocisk ma już znacznie mniejszą energię kinetyczną i na tyle zdeformowaną część wierzchołkową, że zatrzymanie go w miękkim wkładzie balistycznym znajdującym się za płytą (w przypadku rozwiązań ICW - *ang. In Conjunction With* [38]) jest już możliwe. Oczywiście, kamizelka kuloodporna wzmocniona twardymi płytami pancernymi jest cięższa, sztywniejsza, a przez to mniej komfortowa do noszenia jej zwłaszcza w warunkach pola walki. Mimo to, taka kamizelka chroni przed amunicją z broni karabinowej, co w przypadku działań wojennych jest szczególnie istotne [28].

Nie można jednoznacznie stwierdzić, które materiały mające potencjalne zastosowanie w systemach ochrony balistycznej są najlepsze. Oprócz właściwości balistycznych należy bowiem wziąć jeszcze pod uwagę ich przeznaczenie oraz odporność na inne czynniki takie, jak np.: środowisko, oddziaływanie z innymi materiałami itp. Główne czynniki mające wpływ na właściwości balistyczne kamizelek wskazał w swojej książce Hazell P.J. [24]. Posumowanie tych czynników znajdziemy również w opracowaniach Cheeseman i Bogetti (2003) [39], Tabiei i Nilakantan (2008) [40] oraz różnych publikacjach Abrate (1991, 1994) [41].

Odporność na przebicie, jaką zapewniają tkaniny i sztywne kompozyty, obejmuje szereg różnych parametrów, dlatego nie można wyróżnić jednego z nich, który bezpośrednio wskaże na wyższą ochronę balistyczną. Na przykład zwiększenie wytrzymałości włókien jest ważnym czynnikiem zapewniającym wyższą ochronę balistyczną. Jeżeli jednak wytrzymałość byłaby pojedynczym parametrem poprawiającym cechy balistyczne, wówczas można by oczekiwać, że włókna nylonowe będą miały lepsze właściwości niż włókna kevlarowe – co, jak wiemy, nie jest prawdą (Prosser et al. 2000) [42].

Parametry, które są często wykorzystywane do porównywania włókien stosowanych w ochronie balistycznej i przed falą podmuchową, to zarówno zdolność pochłaniania energii przez włókna, jak i prędkość rozchodzenia się fali sprężystej we włóknie.

Energię pochłoniętą na jednostkę objętości można obliczyć na podstawie pomiaru pola powierzchni pod krzywą rozciągania danego materiału. W przypadku włókna o wysokich właściwościach mechanicznych, energię tę można przybliżyć wzorem [24]:

$$U_r = \frac{1}{2} \sigma_t \varepsilon_t \quad (1.1)$$

gdzie:

U_r - to energia pochłonięta na jednostkę objętości materiału [J/m^3].

σ_t - naprężenie rozciągające przy zerwaniu

ε_t - odkształcenie rozciągające przy zerwaniu

Zakłada się liniową odpowiedź naprężenie-odkształcenie, aż do zerwania pod wpływem naprężenia, a zatem dla niektórych włókien jest to zgrubna aproksymacja. Włókna polietylenowe o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE) wykazują wyraźną nieliniowość, gdy odkształcenie zbliża się do zerwania.

Względną absorpcję energii (na jednostkę objętości) można obliczyć za pomocą [24]:

$$U_{sp} = \frac{1}{2} \frac{\sigma_t \varepsilon_t}{\rho_0} \quad (1.2)$$

U_{sp} – absorbcja właściwa energii [kJ/kg]

ρ_0 – gęstość

Z kolei, wartość prędkości propagacji fali sprężystej jest zgodna z zależnością:

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (1.3)$$

E – moduł Younga

Iloczyn c i U_{sp} wskazuje na skuteczność balistyczną pojedynczego włókna w kompozycie i może być używane jako cecha do porównania włókien. Dlatego podaje się go jako (Cunniff 1999)[43]:

$$U^* = \frac{1}{2} \frac{\sigma_t \varepsilon_t}{\rho_0} \sqrt{\frac{E}{\rho_0}} \quad (1.4)$$

U^* - skuteczność balistyczna pojedynczego włókna w kompozycie

Wysoka prędkość fali sprężystej jest ważna, ponieważ pozwala na szybką delokalizację naprężeń z miejsca uderzenia. Względna energia absorpcji (lub względna wytrzymałość) włókna jest miarą tego, ile energii kinetycznej (KE) pocisku może zostać zaabsorbowane podczas uderzenia.

Równanie (1.4) zostało poddane modyfikacji przez Cunniff [43], aby porównać bezwymiarową prędkość V_{50} , dzieląc prędkość V_{50} tkaniny przez pierwiastek sześcienny z równania 1.4 ($U^{*1/3}$). Zostało to następnie porównane z bezwymiarowym parametrem układu obejmującym prezentowaną powierzchnię pocisku, gęstość powierzchniową układu i masę pocisku. Wybrane właściwości włókien przedstawiono w Tabeli 1.8.

Tabela 1.8. Porównanie wybranych parametrów fizyko-mechanicznych oraz względnej zdolności pochłaniania energii dla wybranych włókien stosowanych we wkładach balistycznych [43]

Fibre	ρ_0 (kg/m ³)	E (GPa)	σ_t (GPa)	ε_t (%)	c (m/s)	$U^{*1/3}$ (m/s)
PBO <i>Włókno</i>	1560	169	5.20	3.10	10,408	813
Spectra® 1000	970	120	2.57	3.50	11,123	802
SK60 (Dyneema®)	970	87	2.70	3.50	9471	773
600-denier Kevlar KM2	1440	83	3.40	3.55	7592	683

1.7. Technologie wytwarzania kompozytów

W niniejszym podrozdziale przedstawiono podstawowe procesy produkcji kompozytów balistycznych. W książce prof. Hazzel'a (2016) [24] wyróżniono następujące technologie:

- Formowanie przez prasowanie

Formowanie przez prasowanie to proces, w którym wstępnie impregnowane warstwy kompozytowe są ściskane razem w podgrzewanej formie lub na płaskiej prasie. Wstępnie impregnowane warstwy kompozytowe (lub pre-pregi, lub preimpregnaty) można zakupić na rynku, dzięki czemu skraca się proces wytwórczy, a sam proces budowy płyty kompozytowej staje się prostszy. Główną zaletą prepregów jest to, że żywica pokrywająca zbrojenie jest mieszana przez dostawców i generalnie jest wysokiej jakości; wadą jest to, że są drogie w porównaniu do suchego zbrojenia i mają skończoną żywotność tj. określony czas przydatności do zużycia.

Pre-pregi można kształtować w formach, aby uzyskać bardziej złożony kształt. Pod wpływem nacisku warstwy są podgrzewane, co pozwala żywicy opływać zbrojenie w celu wytworzenia finalnego wyrobu. Technologia ta dedykowana jest do produkcji wielkoseryjnej.

- Formowanie w autoklawie

Formowanie w autoklawie jest podobne do formowania przez prasowanie, z tą różnicą, że element obrabiany umieszczony jest w specjalnym worku z dedykowanej do tego procesu folii, w którym wytwarzana jest próżnia. Zasadniczo autoklaw to naczynie ciśnieniowe z orurowaniem, które umożliwia wytworzenie ciśnienia w komorze, najczęściej w kontrolowanej temperaturze. Pozwala to na wyższy poziom konsolidacji żywicy i zbrojenia. Używanie autoklawu jest generalnie procesem powolnym, a koszt inwestycyjny sprzętu jest wysoki; jednak jakość gotowego produktu – szczególnie tam, gdzie następuje zmiana przekrojów i gdzie występują wąskie promienie – jest wysoka.

- Formowanie z wtryskiem żywicy

Proces formowania transferowego żywicy (RTM) stosuje się zazwyczaj w produkcji wielkoseryjnej. Ta metoda rozpoczyna się od uformowania szkieletu włókien lub maty z tkanego włókna lub wielu mat, które są umieszczane w formie o pożądanym kształcie. Forma jest następnie zaciskana razem, a żywica jest pompowana do formy, wypychając powietrze z krawędzi, aż forma zostanie napełniona. Podgrzanie formy utwardza żywicę i zwykle wymagane są stosunkowo niskie temperatury (około 40°C). Po utwardzeniu części formy są rozdzielane, aby odsłonić gotowy produkt. Zaletą tego procesu jest to, że uzyskuje się dobre

tolerancje wymiarowe i możliwe jest wytwarzanie skomplikowanych kształtów, takich jak sekcje narożne. Można również zastosować szeroką gamę wzmocnień. Kluczem jest wybór żywicy. Musi ona wystarczająco przeniknąć przez wzmocnienie i zwilżyć wiązki włókien, a następnie poddać się procesowi utwardzania, aby wytworzyć sztywną osnowę. Ten proces produkcyjny został szeroko przyjęty w sektorach motoryzacyjnym i lotniczym.

Uzyskany według powyższych metod laminat można zastosować jako wyrób gotowy lub dodatkowo wzmocnić go poprzez połączenie z dodatkowymi materiałami balistycznymi w formie tzw. sandwicha. Najczęściej sam laminat balistyczny nie zapewni odporności balistycznej wyższej niż na pociski karabinowe bez stalowego rdzenia. Jeżeli chodzi o pociski typu przeciwpancernego tzw. AP, wymagana jest warstwa materiału, która jest w stanie skruszyć lub znacząco uszkodzić rdzeń pocisku a następnie pochłonąć znaczną część energii. Najczęściej stosowanymi materiałami na twarde warstwy osłony balistycznej są ceramiki techniczne (jak np. Al_2O_3 , SiC, B_4C) oraz stale przeciwpancerne wysokiej jakości, przy czym obserwuje się trend coraz rzadszego ich wykorzystania [24, 44, 45, 46, 47].

1.8. Podsumowanie analizy literaturowej

Obecnie stosowane materiały z punktu widzenia historycznego są dopiero w fazie rozwoju i dalszego udoskonalania, co wiąże się z potencjałem rozwojowym i badawczym w sferze doskonalenia konstrukcji ochrony balistycznej.

Na podstawie wyżej przedstawionej analizy literaturowej dokonano wyboru materiału rokującego na spełnienie wymagania najniższej masy przy najwyższej klasie odporności balistycznej. Specjalistyczne materiały z grupy polietylenów stanowią potencjał projektowy do wytwarzania lekkich, bezpiecznych i konkurencyjnych balistycznych wkładów kompozytowych do ochrony personalnej. Zgromadzone informacje wskazują na materiały z grupy UHMWPE, które to materiały mają stosunkowo wysoki współczynnik odporności balistycznej przy niskiej gęstości powierzchniowej.

Przeanalizowano metodyki badawcze do oceny skuteczności osłon balistycznych, jak również metodyki do badań właściwości balistycznych stosowanych materiałów. Najczęściej stosowanym na rynku i w literaturze standardem do oceny właściwości ochronnych jest amerykańska norma NIJ 0101.06, natomiast w Polsce jest to norma PN-V-87000.

W dostępnej literaturze nie znaleziono bezpośrednich metod badania tkanin zbrojeniowych do zastosowań w układach kompozytowych wkładów balistycznych, w związku z czym istnieje przestrzeń do badania relacji pomiędzy ich cechami balistycznymi a

właściami fizyko-mechanicznymi, z uwzględnieniem parametru gęstości powierzchniowej. W tym celu właściwe wydaje się opracowanie metodyki porównawczej dla tkanin zbrojeniowych i powiązanie jej z cechami balistycznymi materiałów osłon wyrażonymi za pomocą parametru V_{50} .

ROZDZIAŁ II

Studium wykonalności

W niniejszym rozdziale dokonano porównań rozwiązań konkurencyjnych wkładów balistycznych na rynku oraz zdefiniowano wymagania techniczne na podstawie analizy trendu rozwiązań konstrukcyjnych. Poddano również weryfikacji dostępność technologii produkcyjnych i projektowych przedsiębiorcy, a następnie określone zostały metody spełnienia wymagań i osiągnięcia celów.

2.1. Analiza trendu i dobór parametrów

Pierwszym etapem każdego projektu konstrukcyjnego powinno być wstępne studium wykonalności. W celu określenia parametrów konstrukcyjnych i wymagań techniczno-taktycznych nowoprojektowanej osłony balistycznej przeprowadzono następujące działania: analizę trendów, dobór podstawowych parametrów oraz wstępną ocenę kosztów konstrukcji. Na tym etapie dokonuje się również wstępnej oceny konfiguracji i pierwszych szacunków wymagań technicznych wyrobu. Informacje dotyczące bezpośrednio projektu muszą być również uzupełnione analizami potrzeb w zakresie infrastruktury badawczej, możliwości wytwórczych i dostępności personelu inżynierskiego [48].

Analiza trendów może służyć dwóm celom: zdefiniowaniu wymagań technicznych i zidentyfikowaniu metod ich realizacji. Pierwszy przypadek ma miejsce wtedy, gdy zamawiający nie wyspecyfikuje szczegółowych wymagań lub gdy studium jest realizowane bez udziału zamawiającego. Należy w tym wypadku określić, które cechy mają być ważne dla projektowanego wyrobu i porównać z wynikami osiąganymi przez konkurencyjne konstrukcje. Nie należy przy tym traktować zbyt wielu parametrów jako najważniejsze, gdyż próba zrealizowania zbyt wielu celów zwykle kończy się niepowodzeniem projektu. W praktyce priorytetem powinien być jeden lub co najwyżej dwa parametry.

Po wyselekcjonowaniu odpowiednich konstrukcji należy zestawić ich dane techniczne w tabeli, zwracając uwagę na to, czy poszczególne parametry podawane są w identycznych warunkach. Często zdarza się, że producenci podają informacje o materiałach, określonych w takich warunkach, aby ich konstrukcje wyglądały najkorzystniej na tle konkurencji. Jeśli jednak, dla każdego produktu warunki będą inne, to dane będą nieporównywalne.

Przykładem niejednoznacznie podawanych parametrów jest np. odporność balistyczna dla systemów ochronnych, podawana przez różnych producentów w dowolny sposób. Najczęściej wszystkie oferowane rozwiązania odnoszą się do spełnienia podstawowych norm (wg standardów NIJ, STANAG, PN-EN), jednakże często z ich modyfikacjami np. poprzez nieprecyzyjne oznaczenie typu pocisku lub inne warunki ostrzału. Odporność balistyczna dla ostrzału pojedynczego jest wielokrotnie niższa niż dla warunków ostrzału wielokrotnego (Multihit) [49].

W dalszych krokach analizy, na podstawie zestawienia parametrów różnych konstrukcji, sporządza się wykresy porównawcze priorytetowych cech. Z wykresów tych można wprost odczytać jakie oczekiwane wartości powinny mieć dane cechy, żeby projektowany wyrób był konkurencyjny. Podstawowe cechy dla wkładów balistycznych, które zostały poddane porównaniu to: powierzchnia ochronna, masa własna, poziom ochrony balistycznej oraz gęstość powierzchniowa. Pojęcie „*gęstości powierzchniowej*” jest bardzo powszechnie stosowane w określeniu stosunku wagi do powierzchni danego rozwiązania balistycznego i wyraża się w jednostce kg/m^2 [24, 44, 45, 46, 50]. Stosunek ten, obrazuje konkurencyjność układu w zakresie jego masy, doskonale jest to widoczne w porównaniu do rozwiązań stalowych z innymi systemami kompozytowymi (na rys. 2.4. rozwiązanie ze stali pancernej firmy Shield Tech ČR, cechuje najwyższą gęstość powierzchniową z porównywanych wkładów). W niniejszym opracowaniu, zestawienie wykonane zostało na podstawie danych światowych producentów [51, 52, 53, 54, 55, 56, 57], dla konstrukcji o różnych odpornościach balistycznych i zastosowanych materiałach bazowych. W tabeli 2.1 przedstawiono wytypowane produkty do analizy i doboru parametrów technicznych.

Analiza trendu stosowanych rozwiązań została oparta na wyznaczeniu podstawowych cech wkładu balistycznego, tj.:

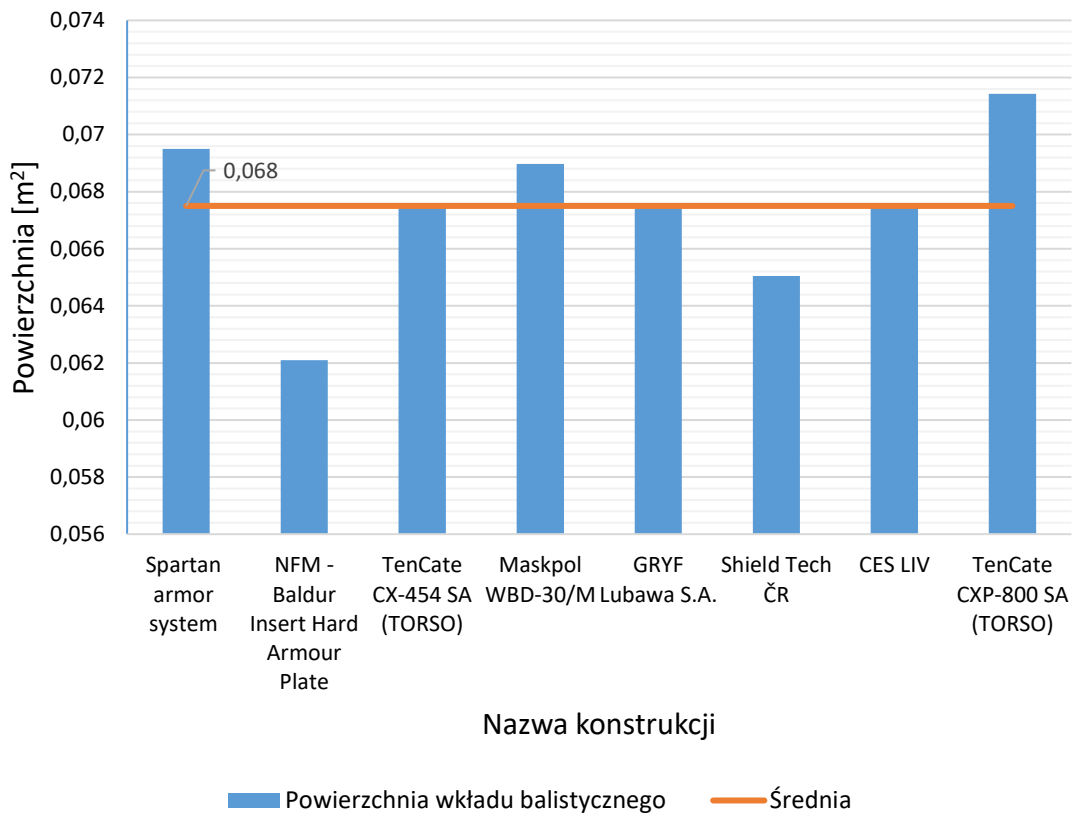
- powierzchni ochronnej
- masy wkładu
- gęstości powierzchniowej oraz
- poziomu ochrony balistycznej

Wartości średnie ww. cech wkładu balistycznego wyznaczono na podstawie zestawień przedstawionych na rys. 2.1. – 2.4.:

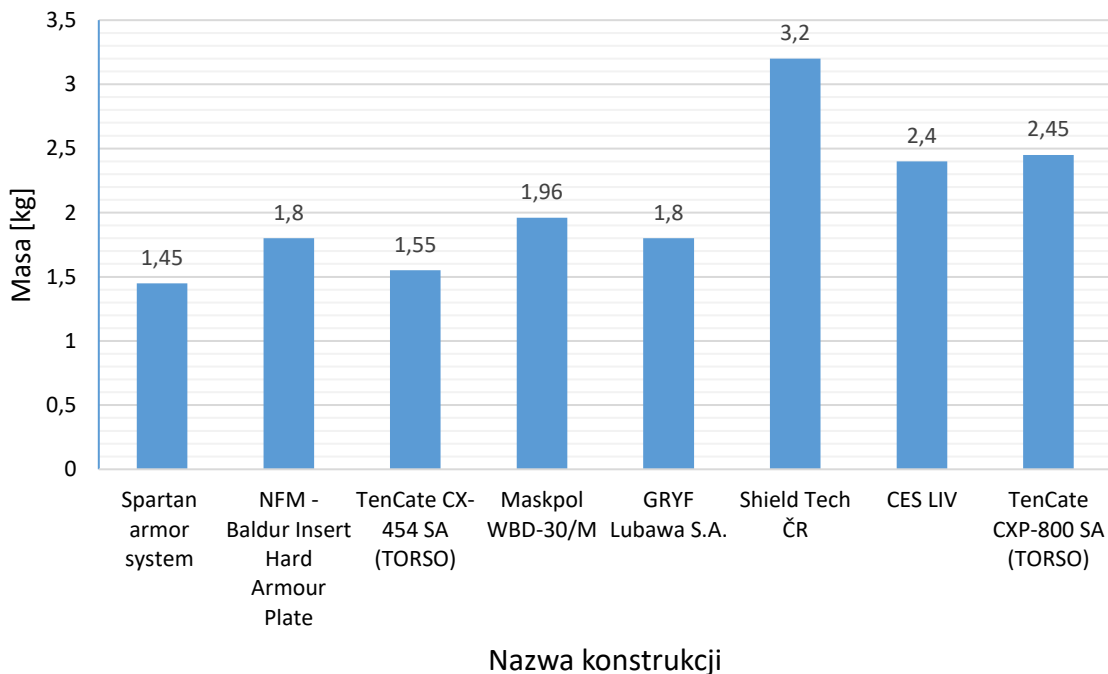
Tabela 2.1. Zestawienie podstawowych parametrów konstrukcyjnych wybranych wkładów balistycznych [51-57]

Nazwa konstrukcji	Odporność balistyczna	Typ	Materiał bazowy	Rozmiar	Masa (kg)
Spartan armor system	NIJ 0101.06 poziom III+ (7.62x51 mm Nato Ball FMJ 847+/- 9m/s 762x39 M43 MSC 720+/- 9m/s)	ICW	UHMWPE	10x12" (254 x 304,8 mm)	1,450
Shield Tech ČR	NIJ III+ (7.62x51 mm Nato Ball FMJ 847+/- 9m/s 762x39 M43 MSC 720+/- 9m/s)	SA	6mm Hardox	245 x 295mm	3,200
TenCate CXP-800 SA (TORSO)	NIJ 0101.04 poziom IV (0.3 M2AP 869 +/- 9m/s)	SA	Ceramika monolityczna/ HPPE	248 x 320mm	2,450
TenCate CX-454 SA (TORSO)	NIJ 0101.04 poziom III+ (7.62x51 mm Nato Ball FMJ 838 +/- 9m/s 762x39 M43 MSC 720+/- 9m/s)	SA	UHMWPE	250 x 300mm	1,550
CES LIV	NIJ 0101.06 poziom IV (0.3 M2AP 878 +/- 9m/s)	SA	Ceramika monolityczna/ HPPE	250 x 300mm	2,400
NFM - Baldur Insert Hard Armour Plate	NIJ 0101.04 poziom III+ (ICW IIIA*) (7.62x51 mm Nato Ball FMJ 838 +/- 9m/s 762x39 M43 MSC 720+/- 9m/s)	ICW	UHMWPE	230 x 300 mm	1,800 (1,300 + 0,500*)
Maskpol WBD-30/M	PN-EN-87000 poziom K3A,B (7,62x39 PS, MSC 720+/- 15m/s 5,56 x 45 SS109 950 +/- 15m/s)	SA	Ceramika monolityczna/ UHMWPE	SAPI (M) 241 x 318 mm	1,960
GRYF Lubawa S.A.	PN-EN-87000 poziom K3A,B (7,62x39 PS, MSC 720+/- 15m/s 5,56 x 45 SS109 950 +/- 15m/s)	SA	Ceramika monolityczna/ UHMWPE	230 x 300 mm	1,800

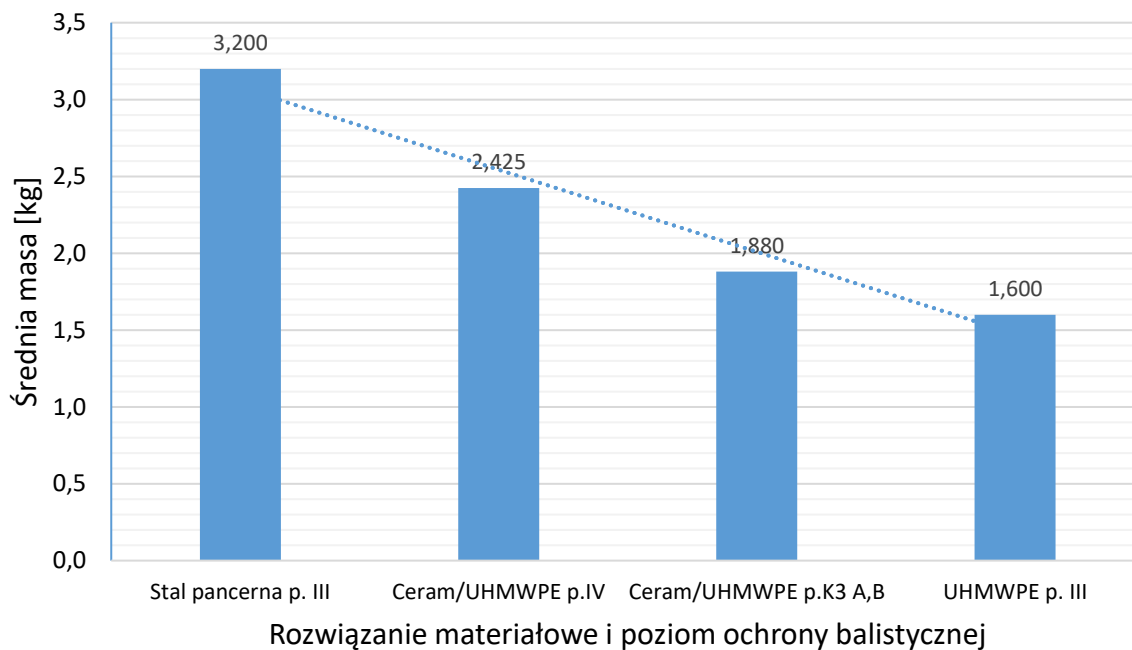
* Średnia gęstość powierzchniowa przyjęta w tym układzie typu ICW dla balistyki miękkiej na poziom IIIA to 7 kg/m² co w przeliczeniu dla powierzchni 0,069m² stanowi nie więcej niż 0,5 kg



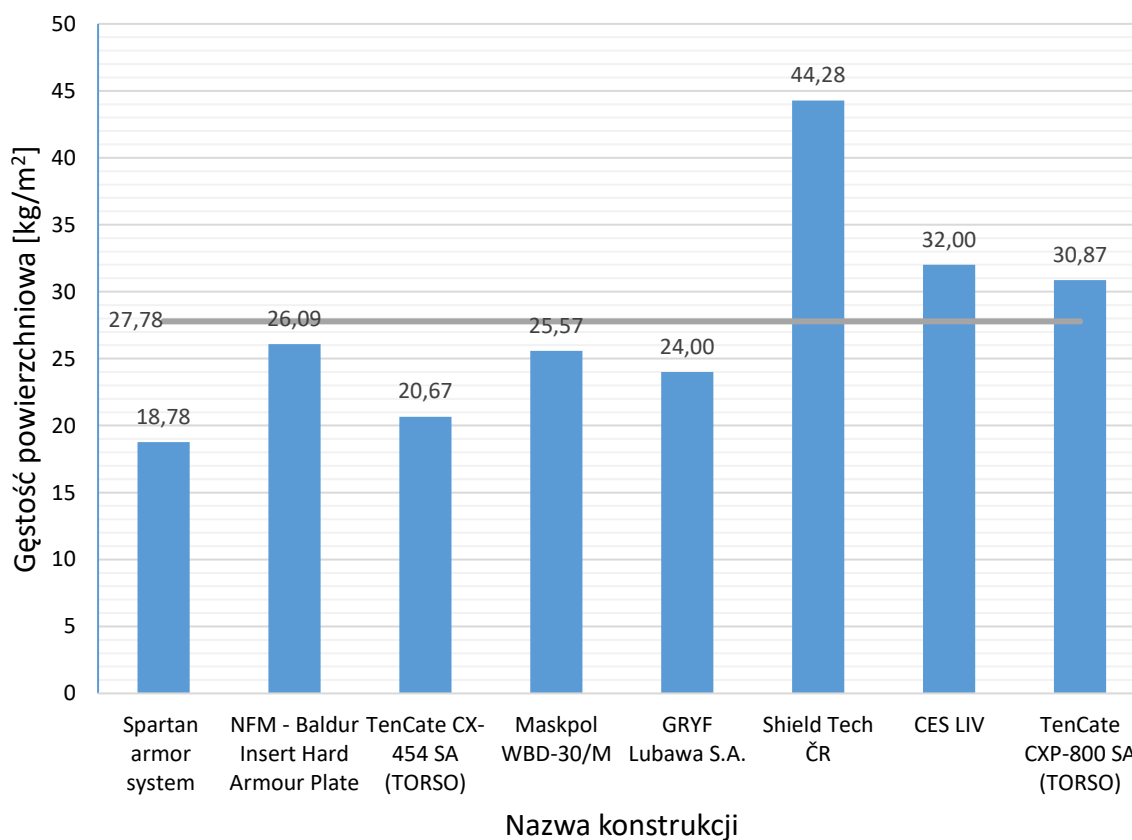
Rys. 2.1. Średnia powierzchnia ochronna wkładów balistycznych



Rys. 2.2. Masa własna wkładów balistycznych



Rys. 2.3. Średnia masa własna wkładów balistycznych zastosowanych układów materiałowych oraz poziomów balistycznych



Rys. 2.4. Średnia gęstość powierzchniowa wkładów balistycznych

W wyniku analizy cech wkładów dostępnych na rynku stwierdzono, że średnio:

- masa wkładu nie przekracza wartości na poziomie równym bądź niższym niż 1,6 kg,
- powierzchnia ochronna wynosząca $0,068 \text{ m}^2 \pm 5\%$,
- poziom ochrony balistycznej jest porównywalny z NIJ 0101.06 klasy III lub PN-V-87000 klasy K3C,
- gęstość powierzchniowa nie przekracza wartości 27 kg/m^2 .

2.2. Przegląd dostępnych technologii firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.

Zgodnie z początkowymi założeniami przedsiębiorcy w zakresie wykorzystania obecnie stosowanych technologii produkcyjnych firmy w rozwoju projektowanego wyrobu, w pierwszej kolejności dokonano przeglądu i weryfikacji potencjału produkcyjnego firmy.

Firma CFT Precyzja Sp. z o.o., pomimo że należy do kategorii małych przedsiębiorstw produkcyjnych (zatrudnia około 50 pracowników) posiada zaawansowany technologicznie park maszynowy i wykorzystuje szereg nowoczesnych technik wytwórczych. Do najważniejszych technik i technologii stosowanych w firmie CFT Precyzja Sp. z o.o. można zaliczyć:

- Analizy MES z wykorzystaniem oprogramowania HYPERWORKS – wykorzystywane do realizacji agendy badawczej firmy oraz projektowania z wykorzystaniem opracowanej w firmie bazy danych materiałowych w zakresie materiałów balistycznych.
- Projektowanie i wytwarzanie w systemach CAD/CAM/CAE:
 - do projektowania i weryfikacji produktów przed ich wytworzeniem używane jest oprogramowanie Autodesk Inventor, AutoCAD oraz SolidWorks,
 - do opracowywania kodów maszynowych wykorzystywanych w obrabiarkach sterowanych numerycznie firma posługuje się oprogramowaniem EdgeCAM,
 - w celu poprawy efektywności procesu zarządzania produkcją wykorzystywany jest zaawansowany system PlanDeCAMPagne.
- Wytwarzanie kompozytów metodą próżniową z zastosowaniem technologii worka próżniowego oraz stołów próżniowych.

- Wytwarzanie kompozytów metodą prasowania niskociśnieniowego do 10 bar oraz wysokociśnieniowego w zakresie 30 do 60 bar z zadaną temperaturą wygrzewania do 175°C.
- Technologia hybrydowa z zastosowaniem prasowania nisko- lub wysokociśnieniowego w połączeniu z próżnią.
- Technologia laminowania ręcznego.
- Technologia cięcia laserowego materiałów włóknistych z rolki w zakresie pola roboczego 1600 x 1000 mm.
- Frezowanie CNC - obróbka detali wymagających wysokiej precyzji i dokładności oraz o wysokim stopniu zaawansowania technologicznego. Frezowanie różnego rodzaju materiałów począwszy od tworzyw sztucznych, metali nieżelaznych, po stale konstrukcyjne czy hartowane. Firma posiada nowoczesne frezarki CNC oraz systemy pomiarowe do kontrolowania i ustawiania detalu na stole roboczym obrabiarki.
- Toczenie CNC - procesy toczenia realizowane są w firmie dla mała i średnioseryjnej produkcji. Na wyposażeniu firmy znajdują się wysokiej klasy tokarki CNC (w tym wieloosiowe centra z przechwytem i głowicami frezującymi).
- Cięcie strumieniem wody - Wycinarka wodna Techjet (2000 x 3000 mm, do 4000 bar) - technologia cięcia strumieniem wody o wysokim ciśnieniu z domieszką ścierniwa; cięcie stali, polimerów, spieków ceramicznych, metali kolorowych, kamienia; materiałów od stosunkowo cienkich folii po materiały o grubości 30 cm. Najbardziej istotne zalety użycia tej technologii to wysokiej jakości wykończenie krawędzi bez potrzeby dalszej obróbki; zachowanie właściwości materiałów ciętych – brak wpływu cieplnego.
- Drażnienie EDM - drażnienie nieprzelotowych kanałków oraz likwidowanie niedoskonałości po obróbce skrawaniem. Odwzorowanie różnych kształtów poprzez zastosowanie odpowiedniej elektrody kształtowej.
- Spawanie - usługi spawalnicze nietypowych gabarytów: dużych korpusów, wymagających szczelności lub odporności na duże obciążenia, jak i niewielkich detali. Spawane materiały: aluminium/metale kolorowe, stale czarne i specjalistyczne. Spawanie metodami MIG / MAG / TIG.
- Szlifowanie precyzyjne (szlifierki do wałków, otworów oraz płaszczyzn).
- Lakierowanie na mokro.

- Techniki pomiarowe - pomiary długości i kąta z zastosowaniem numerycznych maszyn współrzędnościowych, wzorców, sprawdzianów i innych narzędzi pomiarowych. Laboratorium pomiarowe dysponuje jeszcze technologiami pomiaru twardości metodą Rockwella oraz Brinella, jak również chropowości.
- Infrastruktura badawcza - akredytowane laboratorium balistyczne firmy CFT Precyzja Sp. z o.o. (Certyfikat akredytacji laboratorium badawczego nr. AB 1771 wg. PN-EN ISO/IEC 17025:2018 -02) [58], dzięki któremu możliwa jest szybka realizacja testów balistycznych wyprodukowanych osłon balistycznych według norm krajowych i zagranicznych (m. in. STANAG, NIJ, VPAM) oraz badań według wymagań klienta.

Ponadto, laboratorium stwarza możliwości do:

- bezstronnej i niezależnej oceny testowanych wkładów balistycznych;
- badania pojazdów, kamizelek kuloodpornych, hełmów, paneli balistycznych (typu „*add on armor*” oraz „*stand alone armor*”), *spall liner*’ów i innych; wykonywaniu testów w kontrolowanych warunkach środowiskowych (zamknięty tunel balistyczny oraz możliwość kondycjonowania próbek w zakresie temperaturowym od -60 do +100 °C);
- ostrzału próbek o masie do 8 ton z możliwością ich podnoszenia i obrotu za pomocą sterowanej elektronicznie platformy jezdnej (rys. 1.12);
- badania odłamkoodporności oraz kuloodporności do kalibru 14,5 x 114 mm (Poziom IV wg STANAG 4569);
- obserwacji niszczenia panelu ochronnego za pomocą kamery do rejestracji zjawisk szybkozmiennych;
- weryfikacja próbek z wykorzystaniem specjalistycznych wzorcowanych wag.

a)



b)



Rys.2.5. Widok strefy ostrzału w laboratorium balistycznym firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.

2.3. Podsumowanie i wnioski wynikające z analizy studium wykonalności

Analiza trendu balistycznych konstrukcji ochronnych pozwoliła na określenie założeń technicznych dla rozwiązania konstrukcyjnego balistycznego wkładu kompozytowego. Przyjęto uniwersalny rozmiar 250 x 300 mm, który znajduje się na pograniczu rozmiaru M i L wg SAPI [59], ale jest również zgodny z wynikiem analiz trendu z powierzchnią ochronną równą 0,068 m². Rozmiar ten doskonale nadaje się do taktycznych kamizelek łączących balistykę miękką oraz wkłady twarde, jak również dla poszyc kamizelek typu *Plate Carrier* dla płyt samonośnych SA (*ang. Stand Alone*). W przypadku rozwiązań polietylenowych UHMWPE, przyjęto wymaganie odporności balistycznej NIJ 0101.06 poziomu III lub PN-V-87000 poziomu K3C. Założenia projektowe dla nominalnej masy własnej wkładu wynosić będzie nie więcej niż 1,6 kg, natomiast gęstość powierzchniowa projektowanego układu nie powinna przekroczyć wartości 27 kg/m².

Stosowane technologie i możliwości badawcze firmy CFT Precyzja Sp. z o.o. stanowią podstawę do realizacji produkcji prototypów jak również badań technologicznych i balistycznych projektowanych struktur. Najbardziej istotnymi elementami wykorzystywanymi w zakresie produkcji będą technologie wytwarzania kompozytów, w celu realizacji układów modelowych i prototypów, technologie obróbki skrawaniem na potrzeby wytwarzania form lub oprzyrządowania specjalistycznego, technologie CAD/CAM/CAE w zakresie projektowania i wytwarzania oraz zaplecze badawcze i pomiarowe firmy do realizacji badań wstępnych oraz walidacyjnych. Rozbudowany opis parku maszynowego i portfolio produktów zamieszczono katalogu firmy tj. w załączniku nr 1 do niniejszego opracowania.

ROZDZIAŁ III

Cel i zakres pracy

3.1. Cel pracy

Na podstawie analizy literaturowej z zakresu wytwarzania kompozytowych struktur ochronnych stwierdzono, że zakres prowadzonych badań dotyczących wyboru i oceny materiałów oraz wpływu technologii wytwarzania kompozytowych strukturach ochronnych jest ograniczony przede wszystkim do badań gotowych konstrukcji opracowanych metodą prób i błędów. Wyniki przeprowadzonej analizy literaturowej, analizy trendu konstrukcji wkładów oraz oceny możliwości partnera przemysłowego pozwalają na sformułowanie następujących hipotez:

- a) Hipoteza wdrożeniowa: **W zakładzie CFT Precyzja możliwe jest opracowanie i wytworzenie balistycznych wkładów do ochrony personalnej przed pociskami karabinowymi, o parametrach wkładu:**
- masa wkładu równa, bądź mniejsza od 1,6 kg,
 - powierzchnia ochronna wkładu wynosząca $0,068 \text{ m}^2 \pm 5\%$,
 - poziom ochrony balistycznej porównywalny z NIJ 0101.06 klasy III lub PN-V-87000 klasy K3C,
 - gęstość powierzchniowa na poziomie nieprzekraczającym 27 kg/m^2 .
- b) Hipoteza badawcza: **Istnieje korelacja pomiędzy wynikami quasi-statycznych badań wytrzymałościowych materiałów włóknistych (tkanin) a wynikami badań balistycznych wkładów wytworzonych z tych samych tkanin bazowych.**

Ze względu na wdrożeniowy charakter doktoratu zdefiniowano także dwa cele główne pracy, tj., wdrożeniowy i naukowy. **Celem wdrożeniowym jest wytworzenie, na bazie przyjętych założeń konstrukcyjno-technicznych, kompozytowego wkładu balistycznego i zastosowanie jego w pilotażowej partii prototypów wkładów.**

Zaprojektowanie układu materiałowego oraz zastosowanie wysublimowanych procesów technologicznych i kontrolno-jakościowych pozwoli wytworzyć nowe układy materiałowe do zastosowania w systemach ochrony personalnej. Uzyskanie pozytywnych rezultatów pozwoli na ocenę konstrukcji w warunkach przemysłowych i możliwość wdrożenia jej na rynek.

Ponadto, na podstawie analizy literatury stwierdzono duże zainteresowanie badaniem materiałów bazowych, czyli tkanin wykorzystywanych jako zbrojenie kompozytów, w zakresie cech balistycznych i możliwością ich oceny jeszcze przed etapem badania ostrzałem. Ponieważ wcześniejsze badania autora rozprawy były ukierunkowane na poszukiwaniu związków pomiędzy właściwościami mechanicznymi stali pancernych a ich właściwościami balistycznymi [60], postanowiono zastosować podobne podejście w badaniach kompozytów włóknowych. Dlatego **celem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena wpływu właściwości fizyko-mechanicznych materiału bazowego i procesu technologicznego na właściwości balistyczne kompozytu balistycznego**. Założono, że powyższa ocena będzie w szczególności uwzględniała kwestię minimalizacji wartości gęstości powierzchniowej kompozytu włóknistego, parametru bardzo ważnego ze względu na kryteria aplikacyjności stawiane różnym systemom balistycznym.

3.2. Zakres rozprawy

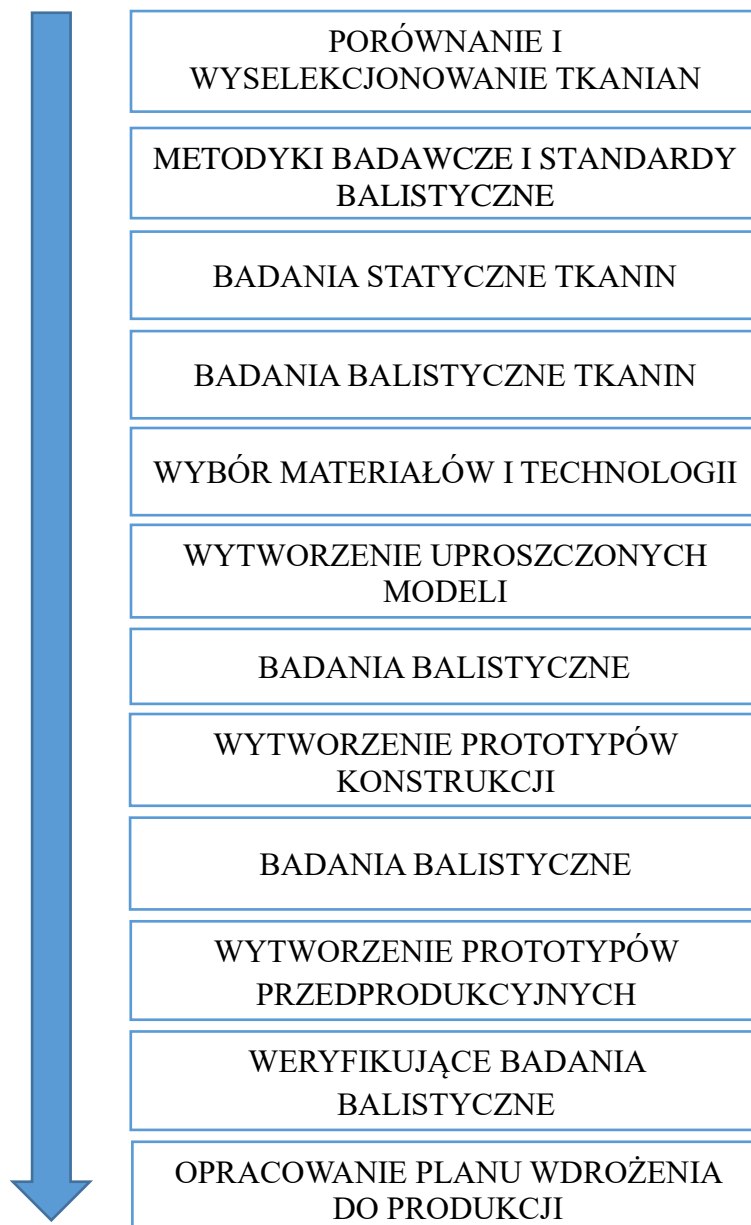
W związku z wdrożeniowym i doświadczalnym charakterem pracy, jej zakres obejmuje badania wytrzymałościowe, technologiczne oraz balistyczne. W przypadku poszczególnych konstrukcji i układów materiałowych, wielokrotnie stosowano badania właściwości fizyko - mechanicznych i poziomów odporności balistycznej.

Zakres rozprawy obejmował następujące zadania:

- Dokonanie oceny porównawczej materiałów włóknistych stosowanych na osłony balistyczne, a następnie wytypowanie materiału/ów, z których potencjalnie mogą być produkowane wkłady balistyczne za pomocą istniejącego obecnie parku technologicznych firmy CFT Precyzja.
- Dobór metodyk badawczych i norm (standardów) balistycznych.
- Opracowanie metodyki badania tkanin zbrojenia laminatu balistycznego w warunkach quasi-statycznego obciążenia statycznego.
- Zaprojektowanie, wykonanie i walidacja konstrukcji uchwytu do mocowania próbek tkanin balistycznych przewidzianych do badań quasi-statycznych.
- Wykonanie próbek materiałowych do badań w warunkach obciążenia quasi-statycznego.

- Badanie tkanin zbrojeniowych kompozytów zgodnie z opracowaną metodyką badawczą badań quasi-statycznych.
- Wykonanie próbek materiałowych do badań obciążeń dynamicznych (balistycznych).
- Badanie cech balistycznych/dynamicznych wytypowanych tkanin zbrojeniowych.
- Dokonanie oceny wyników badań quasi-statycznych i balistycznych.
- Wybór preferowanego/preferowanych rozwiązań do dalszych prac prototypowych.
- Opracowanie technologii produkcji wkładu balistycznego.
- Opracowanie uproszczonych modeli wkładu balistycznego oraz badania na odporność balistyczną, a następnie ewentualna modyfikacja technologii wytwarzania wkładów i ich rozwiązań konstrukcyjnych.
- Wytworzenie i badanie konstrukcji prototypowych w wersji funkcjonalnym, a następnie eliminacja konstrukcji o niskim współczynniku rokowania.
- Wytworzenie prototypów przedprodukcyjnych do badań certyfikujących lub weryfikujących.
- Badania certyfikujące lub weryfikujące zgodnie z wymaganiami przyjętej normy.
- Opracowanie planu wdrożenia wyrobów i technologii w zależności od wariantu produkcyjnego (produkcja małoseryjna, seryjna i wielkoseryjna).
- Dyskusja wyników i możliwości rozwoju zastosowanej konstrukcji.

Schematyczna ilustracja zakresu prac zrealizowanych w ramach niniejszej rozprawy przedstawiono na rys. 3.1.



Rys. 3.1. Schematyczna ilustracja przedsięwzięć (zakres pracy) podjętych w celu udowodnienia hipotezy i osiągnięcia celów rozprawy

ROZDZIAŁ IV

Materiały, przygotowanie próbek i metody badawcze

W rozdziale przedstawiono rodzaje i właściwości fizyczne materiałów stosowanych w produkcji osłon balistycznych, jak również przeanalizowano możliwości ich wykorzystania w zakresie technologii stosowanych w firmie CFT Precyzja. W kolejnych podrozdziałach dokonano omówienia metod badawczych oraz zaprezentowano etapy wykonywania próbek materiałowych dla poszczególnych etapów badawczych niniejszej dysertacji.

4.1. Charakterystyki materiałów i ich dobór

W niniejszym podrozdziale zostały scharakteryzowane główne grupy materiałowe, jakie są stosowane w lekkich osłonach balistycznych, ze szczególnym uwzględnieniem włókien aramidowych i polietylenowych. Jak wskazuje autor Shuang-yan Wu [61], aby zapewnić ochronę przed uderzeniami o dużej prędkości przy zachowaniu minimalnego komfortu użytkowania i mobilności, do zastosowań balistycznych preferowane są materiały twarde, a jednocześnie bardzo lekkie (o małej gęstości). Wymagania te spełniają wspólnie włókna polimerowe o wysokiej wytrzymałości właściwej, wysokim module Younga i niskiej gęstości. Dzięki tym cechom, materiały te są szczególnie wydajne w pochłanianiu i rozpraszaniu energii uderzenia.

4.1.1. Opracowanie założeń dla półfabrykatów/materiałów ze szczególnym uwzględnieniem wymagań dotyczących masy wkładu kompozytowego

W przeglądzie literaturowym (rozdział 1.5) przedstawiono już ogólnie materiały włókniste stosowane do produkcji kompozytowych lekkich osłon balistycznych. Jednakże, aby opracować założenia dla półfabrykatów wkładów balistycznych konieczne jest przeprowadzenie szczegółowej analizy charakterystyk fizyko-mechanicznych materiałów włóknistych, szczególnie tych obecnie dostępnych na rynku. Poniżej scharakteryzowano najważniejsze grupy materiałów włóknistych i wyszczególniono te cechy, które w zasadniczy sposób determinują potencjalne zastosowanie włókien polimerowych w osłonach balistycznych [61].

- **Włókno para-aramidowe**

Włókna aramidowe to wysokowydajne włókna z pierścieniami aromatycznymi i wiązaniami amidowymi w szkielecie. Unikalna struktura tych włókien nadaje im wysoką odporność termiczną (rozkłada się w ok. 400 °C), siłę właściwą i moduł Younga. Na podstawie budowy chemicznej aramidy można podzielić na para-aramid (Kevlar®, Twaron®), meta-aramid (Momex®) i kopolimer aramidowy (Technora®). Wśród nich włókno para-aramidowe jest najczęściej używane do balistycznych paneli tkaninowych i do kompozytów, ze względu na jego wyjątkowe właściwości mechaniczne i odporność na uderzenia. Przeprowadzono różne badania, aby opracować materiały i kompozyty na bazie włókien para-aramidowych. Jednak ze względu na regularne ułożenie wzdłuż włókna jego łańcuchów molekularnych, włókno aramidowe ma gładką i nieaktywną chemicznie powierzchnię, która wykazuje słabą adhezję międzyfazową do matryc polimerowych. Aby poprawić aktywność powierzchniową, zwilżalność i adhezję włókna z matrycą, podejmowane są liczne próby modyfikacji powierzchni włókien aramidowych, w tym poprzez chemiczne i fizyczne obróbki, jak np. trawienie chemiczne, szczepianie powierzchniowe, utlenianie chemiczne, polimeryzacja, środki sprzęgające, obróbkę cieplną, obróbkę plazmową, rozpylanie jonowe, wiązkę elektronową. Co więcej, stwierdzono również, że modyfikacja matryc żywicznych poprawia adhezję włókna z matrycą [61, 62, 63, 64].

- **Włókno polietylenowe o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE)**

Polietylen o ultra-wysokiej masie cząsteczkowej jest jednym z rodzajów termoplastycznego polietylenu o wzorze chemicznym $-(C_2H_4)_n-$, którego stopień polimeryzacji (n) UHMWPE może sięgać nawet 200 000. Jego średnia masa cząsteczkowa wynosi do 6 milionów g/mol przy wyjątkowo długich łańcuchach, wzdłużnej orientacji łańcuchów molekularnych (> 95%) i wysokiej krystaliczności (do 85%). Podczas uderzenia pociskiem długie łańcuchy molekularne skutecznie przenoszą siłę do szkieletu molekularnego poprzez silne oddziaływania międzycząsteczkowe sprawiają, że włókna UHMWPE doskonale pochłaniają energię uderzenia. Poza tym włókno UHMWPE (np. Endumax®, Spectra® i Dyneema®) charakteryzuje się niską gęstością (0,97 g/cm³), wyjątkowo wysoką wytrzymałością właściwą, wysokim modułem i stosunkowo dużym odkształceniem przy zerwaniu (~ 3%) [65]. W porównaniu z włóknem para-aramidowym, włókno UHMWPE wykazuje o około 40% wyższy stosunek wytrzymałości do masy. Dzięki wyjątkowym właściwościom włókno UHMWPE jest preferowane zastosowań do w lekkich osłonach balistycznych, takich jak pancerze osobiste [61, 66, 67].

Bardzo duża grupa naukowców badała materiały kuloodporne na bazie włókien UHMWPE, w formie tkanin, paneli i tekstylnych form kompozytowych [68, 69]. Stwierdzono, jednak, że w zastosowaniach balistycznych włókno UHMWPE wykazuje dość istotne wady, jak np. niską odporność na pęcznienie, niską temperaturę topnienia (144 - 152 °C) oraz słabą adhezję włókien do matrycy wynikającą z małej chropowatości powierzchni włókna oraz brak grup polarnych w jego strukturze.

- **Włókno szklane**

Włókna szklane to powszechnie stosowana klasa materiałów wykonanych z krzemionki i minerałów. Można je skategoryzować na różne typy w zależności od ich kompozycji, wykonania i zastosowań końcowych. Na przykład włókno szklane typu E ma niską przewodność elektryczną, S ma wysoką wytrzymałość, C ma wysoką odporność chemiczną, a typ M ma wysoką sztywność. Wśród wszystkich typów, włókna szklane E i S są głównie badane w aplikacjach balistycznych [70, 71]. Włókno typu S, zaprojektowane ze względu na wysoką wytrzymałość na rozciąganie, ma zastosowanie w konstrukcjach o przeznaczeniu militarnym już od 1970 r. Jego wysoka wytrzymałość na rozciąganie, wydłużenie, stabilność termiczna i chemiczna, prowadzi do doskonałej absorpcji energii i funkcji ochrony przed uderzeniami, ogniem, toksycznymi chemikaliami oraz na gazy. Wraz z niskim kosztem i lekkością, włókno szklane S staje się alternatywnym rozwiązaniem do zastosowań kuloodpornych. Jednak nadal istnieją jego ograniczenia w zastosowaniach balistycznych, wynikających m.in. z niskiego modułu Younga, niskiej odporności na zmęczenie i niskiej kompatybilności z matrycami polimerowymi [61].

- **Włókno węglowe**

Włókno węglowe to wytrzymały i lekki materiał włóknisty składający się głównie z atomów węgla. Średnica włókna węglowego wynosi około 5-10 μm . Posiada wysoką wytrzymałość i sztywność właściwą (odniesioną do masy włókna), wysoką odporność chemiczną i stabilność termiczną, oraz niską rozszerzalność cieplną. Materiał ten jest lżejszy od stali, jest pięciokrotnie mocniejszy i dwukrotnie sztywniejszy, dzięki czemu jest idealnym materiałem wzmacniającym dla rozwiązań balistycznych. Chociaż włókno węglowe samo w sobie nie jest odporne balistycznie ze względu na jego kruchość, to jednak zastosowanie jednej lub więcej warstw tkaniny węglowej może podwyższyć integralność strukturalną i poprawić odporność na ściskanie w zastosowaniach balistycznych. Włókna węglowe w postaci taśm,

tkanin i cięższych dzianin są zalecane jako materiał do wytwarzania kuloodpornych laminatów i kompozytów [71, 72, 73].

- **Włókno naturalne**

Większość włókien naturalnych, zwłaszcza włókien lignocelulozowych pozyskiwanych z roślin, nie ma pożądanej cechy wysokiej odporności balistycznej. Jednak ze względu na ich wysoką efektywność kosztową, zrównoważenie środowiskowe, niższa gęstość, łatwą produkcję i zalety recyklingu, naturalne włókna przyciągają coraz więcej uwagi w zastosowaniach ochronnych [74]. W literaturze włókna naturalne, takie jak juta, konopie, włókna lnu, sizalu, ramii, kenaf, włókna kokosowego, curaua, bagasy, malwy, bambusa i piassava są badane pod kątem zastosowań balistycznych i przeciwuderzeniowych w formach kompozytowych. Na przykład, włókno curaua, które ma niższą gęstość ($0,96 \text{ g/cm}^3$) niż włókna aramidowe i szklane ($1,44 \text{ g/cm}^3$ i $2,58 \text{ g/cm}^3$), wykazują się porównywalną wytrzymałością właściwą na rozciąganie ($\sim 2,2 \text{ GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$) do włókien aramidowych ($\sim 2,8 \text{ GPa}\cdot\text{cm}^3/\text{g}$). Stąd, w literaturze pojawiają się informacje o obiecujących właściwościach balistycznych ww. włókna po wzmocnieniu żywicą epoksydową i tlenkiem grafenu (GO) [75]. Uwagę inżynierów i naukowców zajmujących się materiałami włóknistymi w zastosowaniach balistycznych zwraca kolejne włókno naturalne, tj. włókno bazaltowe, które wytwarza się z czarnej magmy wulkanicznej. Jest ono nietoksyczne, przyjazne dla środowiska i łatwe w produkcji, dlatego uważane jest za zielony materiał przemysłowy. Ze względu na dużą odporność na uderzenia i inne interesujące właściwości, włókno bazaltowe może być dobrą alternatywą w produkcji odzieży ochronnej, materiałów blokujących ogień i wkładów izolacji budynków [61, 76].

- **Inne włókna**

Oprócz wymienionych wyżej materiałów włóknistych, włókna, takie jak nylon, włókno jedwabne, włókna ceramiczne, włókno HMPP, włókno borowe, włókna metaliczne, poliester aromatyczny i polihydrochinono-diimidazopirydyna (PIPD), są także rozpatrywane jako materiały do zastosowań w kamizelkach kuloodpornych [77]. Włókna te często łączone są z innymi wysokowydajnymi włóknami w celu poprawy wytrzymałości i zdolności pochłaniania energii finalnych kompozytów balistycznych, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ich produkcji [61, 78].

Na rys. 4.1 i w tabeli 4.1 zestawiono właściwości fizyczne i mechaniczne balistycznych materiałów włóknistych, aby dokonać analizy porównawczej i ukazania ich zalet ze względu na zastosowanie w różnych typach osłon balistycznych. Jak można wywnioskować z przedstawionych tam zestawień danych, powszechnie stosowane włókna para-aramidowe i UHMWPE w osłonach przeciwpancernych wykazują się dobrym stosunkiem wytrzymałości, wartości modułu sprężystości i wielkości odkształcenia przy zerwaniu do ich gęstości. Oba włókna mają porównywalne właściwości mechaniczne, jednak włókno UHMWPE charakteryzuje się ogólnie wyższą wytrzymałością właściwą na rozciąganie i modułem sprężystości właściwej (rys 4.1). Z porównania tego wynika także, że ww. włókna przewyższają wyraźnie stal.

Aby opracować lekką i wytrzymałą osłonę balistyczną, preferowane są, jak wspomniano wcześniej, materiały włókniste o wysokim module właściwym i wytrzymałości właściwej. Związane jest to z pożądaną relacją pomiędzy prędkością podłużnej fali dźwięku C_0 propagującą się we włóknie, a energią przenoszoną przez włókna E_s (określana także terminem energia zerwania włókna), wyrażoną równaniami (4.1) i (4.2). Przewiduje się, że opracowane w przyszłości wysokowydajne włókna będą podążać zgodnie z linią trendu przedstawioną na rys. 4.1 i opisaną równaniem (4.3) [61, 78, 79].

$$STM = \frac{E}{\rho} = C_0^2 \quad (4.1)$$

$$STS = \frac{\sigma}{\rho} = \frac{2E_s}{\varepsilon} \quad (4.2)$$

$$STM = 0.0185 \times STS^{1.44} \quad (4.3)$$

gdzie,

STM – moduł sprężystości właściwej,

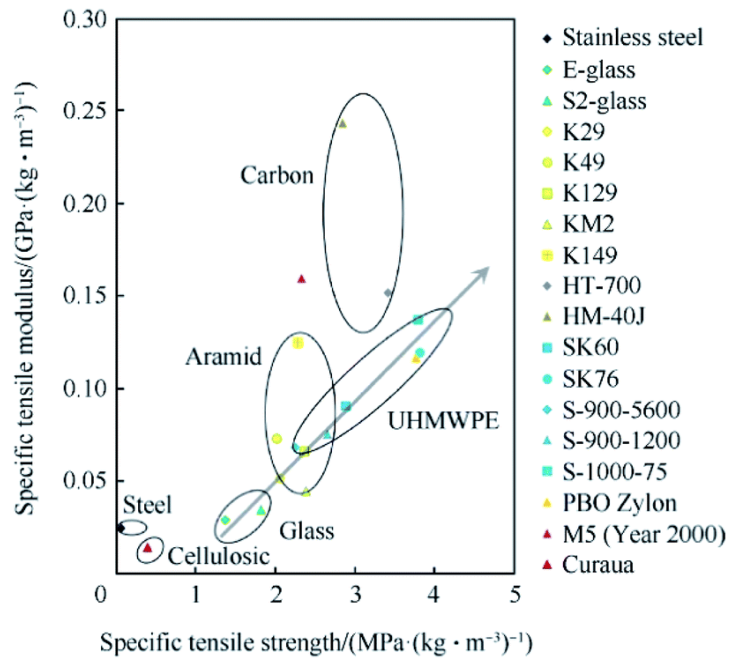
STS – wytrzymałość właściwa,

E – moduł Young'a (włókna),

ρ – gęstość włókna,

σ – naprężenie odpowiadające granicy plastyczności włókna,

ε – odkształcenie odpowiadające granicy plastyczności,



Rys. 4.1. Porównanie wytrzymałości właściwej i modułu sprężystości właściwej przy rozciąganiu dla materiałów włóknistych przewidzianych do zastosowań balistycznych [79]

Tabela 4.1. Gęstość i właściwości mechaniczne materiałów włóknistych do zastosowań balistycznych [61]

Typ włókna	Nazwa włókna	Gęstość [g/cm ³]	Wytrzymałość na rozciąganie [GPa]	Moduł Younga [GPa]	Odształcenie do zerwania [%]
Włókna jedwabne	Jedwab jedwabnika	1,32	0,5	5	15
	Nić pająka	1,32	1,3	22	40
Nylon	Nylon 6	1,14	0,5	3	18-26
Włókna szklane	S-Glass	2,48	4,4	90	5,7
	E-Glass	2,63	3,5	68,5	4
Włókna ceramiczne	Glin	250	1,72	152	2
	Węglik krzemu	280	4	420	0,6
Włókna węglowe	Standard	1,77	3,65	33,5	1,5
	Celion	1,8	4	230	1,8
	Aksaca	1,78	4,2	240	1,8
Para-Aramid	Technora, Teijin	1,39	3	70	4,4
	Twaron, Teijin	1,45	3,1	121	2
	Kevlar 29	1,44	2,97	70	4,2
	Kevlar 129	1,44	3,39	96	3,5
	Kevlar 49	1,44	2,97	113	2,6
	Kevlar KM2	1,44	3,3	70	4
UHMWPE	Spectra 900	0,97	2,4	73	2,8
	Spectra 1000	0,97	2,83	103	2,8
	Spectra 2000	0,97	3,34	124	3
	Dyneema	0,97	2,6	87	3,5
Poliester aromatyczny	Vectran	1,47	3,2	91	3
PIPD	M5 Fiber (Goal)	1,7	9,5	450	2,0-2,5
	M5 Fiber (Conservative)	1,7	8,5	300	2,5
Włókna naturalne	Curaua	0,96-1,42	1,3-3,0	30-80	2,5-6,0
	Juta	1,23-1,5	0,3-0,8	10-55	1,1-2,5
	Sizal	1,2-1,45	0,3-0,9	16-26	2,0-8,0
	Konopie	1,35	0,5-1,1	45	1,8-3,0

Biorąc pod uwagę wskaźniki masowe, wytrzymałościowe i ekonomiczne przyjęto, że kolejne analizy zostaną przeprowadzone dla grupy materiałowej włókien aramidowych i polietylenowych (UHMWPE). Materiały te, zgodnie z linią trendu przedstawioną na rys. 4.1, cechują się bardzo dobrymi wskaźnikami wytrzymałościowo-masowymi, przez co kwalifikują się do zastosowania w systemach ochrony balistycznej.

4.1.2. Wytypowanie materiałów włóknistych możliwych do zastosowania w technologii produkcyjnej firmy

Po analizie technologii produkcyjnych firmy CFT Precyzja Sp. z o.o. oraz biorąc pod uwagę wyniki analizy trendów rozwojowych kompozytów balistycznych, wytypowano materiały mające najlepsze cechy masowo-wytrzymałościowe, i które mogą być potencjalnie wykorzystane w działalności produkcyjnej zakładu.

Podstawowym czynnikiem wziętym pod uwagę jest możliwość obróbki materiału wejściowego w zakresie cięcia maszynowego. Ze względu na fakt, że większość materiałów tkanych lub prelaminiowanych występuje w postaci nawojów na rolkach, dlatego przyjęto kryterium podatności rozpatrywanego materiału włóknistego na cięcie wiązką laserową.

Kolejnym czynnikiem i kryterium przyjętym w procesie wyboru włóknistego materiału bazowego, jest podatność danego materiału do formowania technologią próżniową oraz prasowania niskociśnieniowego i wysokociśnieniowego. Materiały użyte do powyższych technologii muszą być podatne na stosowanie specjalistycznych systemów adhezyjnych lub muszą zawierać warstwę kleju (prepreg).

Wytypowano materiały trzech wiodących producentów tkanin stosowanych w balistyce tj. firmy Teijin, Honeywell oraz DSM, które będą stanowić podstawę do dalszych analiz i opracowań realizowanych zgodnie z założonymi kryteriami doboru.

Tabela 4.2. Wytypowane materiały bazowe

Materiał podstawowy do dalszych analiz	Gatunek	Splot	Podatność na cięcie laserowe	Zastosowanie w założonej technologii
Teijin PE	UHMWPE	UD (0° / 90°)	TAK	TAK
Teijin UD	Aramid	UD (0° / 90°)	TAK	TAK
Teijin T750	Aramid	Tkany (0° / 90°)	TAK	NIE
Honeywell PE	UHMWPE	UD (0° / 90°)	TAK	TAK
DSM PE 1	UHMWPE	UD (0° / 90°)	TAK	TAK
DSM PE 2	UHMWPE	UD (0° / 90°)	TAK	TAK
DSM PE 3	UHMWPE	UD (0° / 90°)	TAK	TAK

Analizując zestawienie przedstawione w tabeli 4.2, wszystkie wytypowane włókniste materiały bazowe są podatne na cięcie za pomocą wiązki lasera, jednakże aramidowy materiał Teijin T750 nie spełnia kryterium podatności na założoną technologię. Wybrana technologia

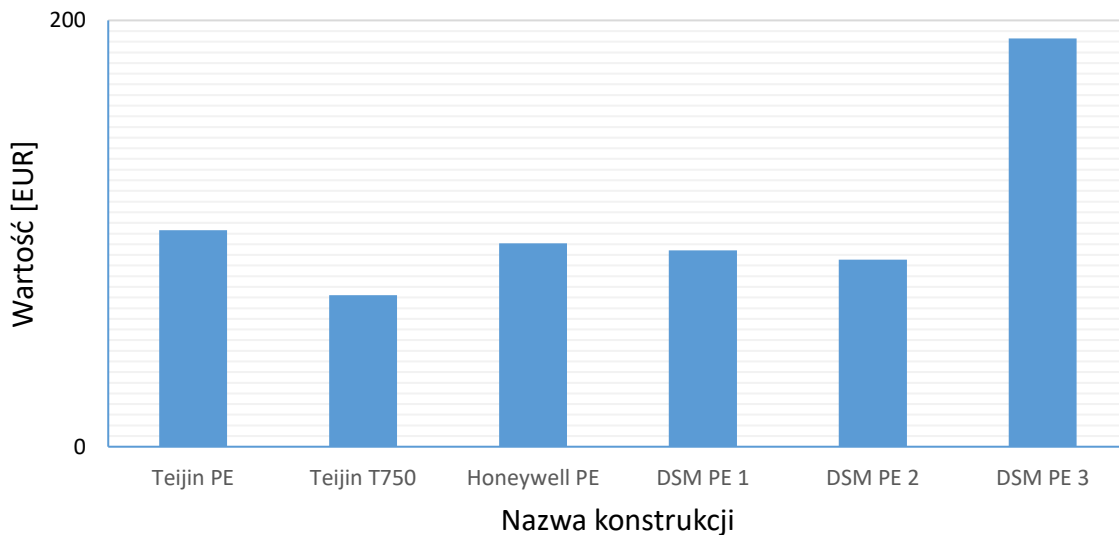
prasowania wysokociśnieniowego z materiałów termoplastycznych lub wstępnie przesyconych materiałem adhezyjnym (jak prepreg), wymaga powtarzalności w ułożeniu wszystkich warstw. Oznacza to również brak podatności na zmianę układu tkaniny po cięciu laserem. Tkanina Teijin T750, ze względu, że jest materiałem o splocie tkanym bez żadnej dodatkowej osnowy, podatna będzie na rozwarstwienia włókien i zmianę ich orientacji względem siebie. Kryterium powtarzalności produkcji oraz minimalizacji potencjalnych wad jakościowych, stanowiło dodatkową podstawę do wykluczenia tego materiału. Pozostałe materiały bazowe o splocie UD spełniają powyższe kryterium i w ich przypadku brak jest ryzyka rozwarstwienia.

4.1.3. Analiza wytypowanych materiałów oraz konstrukcji wkładów balistycznych ze względu na czynniki ekonomiczne i konkurencyjność rynkową

Niezwykle istotnym czynnikiem brany pod uwagę podczas projektowania osłon balistycznych jest nie tylko spełnienie założonych wymagań technicznych, ale również wymagań związanych z konkurencyjnością rynkową (ekonomiczną). Uwzględnienie czynników ekonomicznych i wyników analizy trendów rozwojowych, pozwoli zaprojektować rozwiązanie mające duże szanse na skuteczne wdrożenie i osiągnięcie sukcesu komercyjnego.

Zasadniczy wskaźnik konkurencyjności opracowano na podstawie analizy trendów rozwojowych różnych rozwiązań osłon balistycznych, zwracając szczególną uwagę na wpływ ceny samego materiału włóknowego na całkowite koszty końcowego wyrobu.

Na rys. 4.2. przedstawiono porównanie kosztów zakupu wytypowanych materiałów bazowych, jakie należałoby ponieść w przypadku rozwiązania konstrukcyjnego wkładu balistycznego o masie ok. 1600 g. Materiał bazowy o oznaczeniu DSM PE3 znacząco odbiega od wartości pozostałych materiałów, różnica ta jest blisko dwukrotna. Nie należy jednak na tym etapie pracy traktować tego kryterium jako kryterium eliminacyjne, gdyż w zależności od uzyskanych rezultatów prób balistycznych, wytypowane rozwiązania mogą różnić się masą układu. Końcowy rezultat, rozwiązań spełniających wymagania wymaganej klasy odporności balistycznej, a tym samym ich masy, znajdzie odzwierciedlenie w faktycznych kosztach opracowanej konstrukcji.



Rys. 4.2. Wykres porównawczy kosztu materiałowego dla szacunkowego rozwiązania o masie 1600 g

4.2. Przygotowanie próbek – technologia produkcji

W tej części pracy przedstawiono opis szeregu przeprowadzonych prac doświadczalnych, od wytworzenia próbek do badań quasi-statycznych, dobór uproszczonych modeli wkładów balistycznych, poprzez szereg badań i procesów optymalizacyjnych, aż do wytworzenia końcowych prototypów wkładów. W podrozdziale tym przedstawiono także wyniki analizy procesu produkcyjnego pod kątem możliwości jego dostosowania do zakładanych wielkości partii produkcyjnych.

4.2.1. Próbki tkanin do badań quasi-statycznych

Przygotowanie próbek materiałowych realizowano za pomocą technologii cięcia laserowego z użyciem lasera CO₂ o polu roboczym 1600 x 1000 mm i mocy 160 W ze szklaną tubą laserową (rys. 4.3). Wykorzystane urządzenie posiada przepust do tkanin z rolki oraz stół roboczy z podciśnieniem, co zapewnia powtarzalność wykonywanych rozkrojów.



Rys. 4.3. Ploter laserowy do tkanin firmy AEON służący do wytwarzania układów materiałowych

Rozkrój próbek wykonano zgodnie z przyjętą metodyką opisaną w rozdziale 4.3.1 z zachowaniem parametrów kształtu, i co najważniejsze, ułożenia kierunku włókien. Wycięte próbki oznaczono i zważono (patrz tabela 4.3). Część próbek została połączona w pakiet 2 warstwy celem zweryfikowania różnic we właściwościach wytrzymałościowych. Wykonano po 3 zestawy próbek na każdy typ i układ materiału.

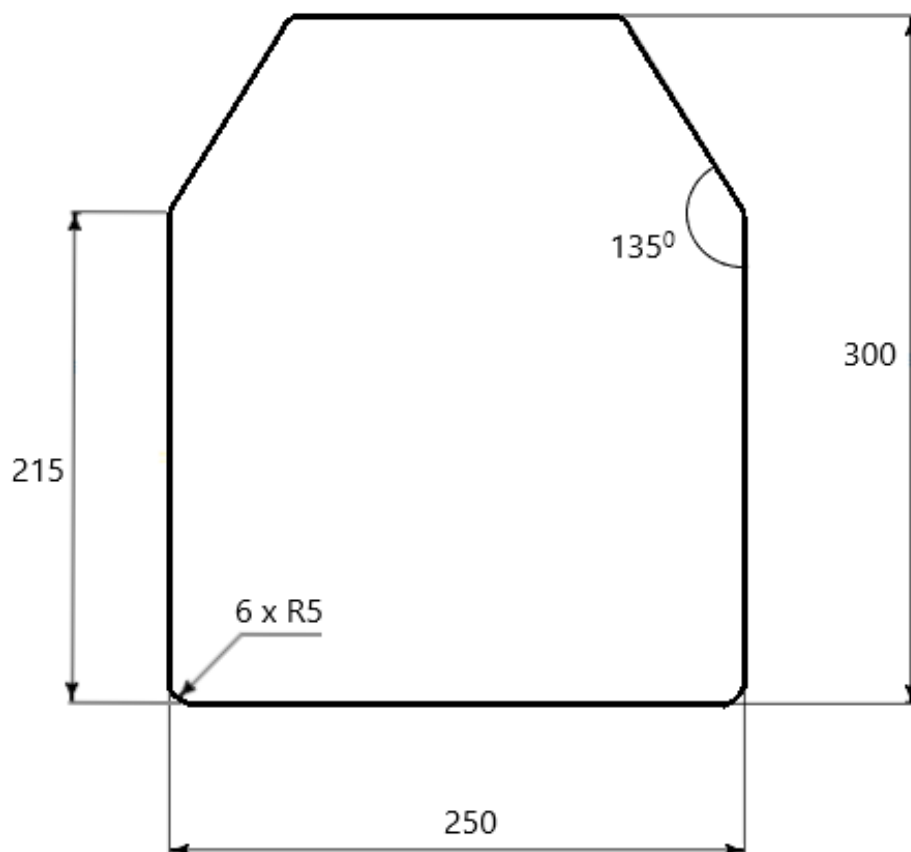
Tabela 4.3. Zestawienie przygotowanych próbek do badań statycznych

Nazwa Próbkki	Układ	Masa próbki [g]
Teijin PE	<i>1 warstwa</i>	10,3
Teijin UD	<i>1 warstwa</i>	17,0
Honeywell PE	<i>1 warstwa</i>	17,5
DSM PE 1	<i>1 warstwa</i>	16,2
DSM PE 2	<i>1 warstwa</i>	18,1
DSM PE 3	<i>1 warstwa</i>	9,4
Teijin PE	<i>2 warstwy</i>	20,6
Honeywell PE	<i>2 warstwy</i>	35,0
DSM PE 1	<i>2 warstwy</i>	32,4
DSM PE 3	<i>2 warstwy</i>	18,8

4.2.2. Próbkki do badań balistycznych

- **Przygotowanie próbek tkanin do badań cech balistycznych**

Próbki do tkanin do badań balistycznych wykonano w geometrii docelowego kształtu wkładu balistycznego (rys. 4.4.). Cięcie próbek wykonano również z zastosowaniem wiązki laserowej.



Rys. 4.4. Geometria kształtu próbki wykonanej z tkaniny zbrojeniowej do badań cech balistycznych

W celu przeprowadzenia wiarygodnej oceny odporności balistycznej na podstawie parametru V_{50} zgodnie z metodyką opisaną w rozdziale 4.3.2 skompletowano układy warstw w taki sposób, żeby masy wytypowanych próbek były możliwie jak najbardziej zbliżone do siebie – przyjęto kryterium $182\text{g} \pm 3\%$ (tabela 4.4.). Wykonano dwa komplety próbek na każdy typ materiału.

Tabela 4.4. Zestawienie przygotowanych próbek do badań cech balistycznych

Nazwa Próbkki	Układ	Masa próbki [g]
Teijin PE	<i>Pakiet warstw</i>	187
Teijin UD	<i>Pakiet warstw</i>	187
Honeywell PE	<i>Pakiet warstw</i>	180
DSM PE 1	<i>Pakiet warstw</i>	177
DSM PE 2	<i>Pakiet warstw</i>	181
DSM PE 3	<i>Pakiet warstw</i>	179

- **Opracowanie wstępnych rozwiązań konstrukcyjnych wkładu balistycznego – technologia produkcji**

Wytworzenie wstępnych (uproszczonych) rozwiązań konstrukcyjnych wkładów oparto na technologii prasowania wysokociśnieniowego z zastosowaniem prasy przedstawionej na rys. 4.5. Natomiast wykroje wstępne próbek zostały przygotowane za pomocą wycinania laserowego. Zgodnie z wcześniejszymi przeprowadzonymi analizami, trendu i właściwości balistycznych, do dalszych prac wytypowano materiały z grupy UHMWPE. Układy materiałowe zostały przygotowane w taki sposób, aby spełnić oczekiwane właściwości balistyczne przy zachowaniu jak najmniejszej masy.



Rys. 4.5. Prasa wysokociśnieniowa użyta do wytwarzania wkładów balistycznych

Zestawienie danych opisujących układ tkanin balistycznych ułożony w pakiety do prasowania wysokociśnieniowego przedstawione zostało w tabeli 4.5. Zgodnie z wcześniej sformułowanymi wymaganiami złożono warstwy o wymiarach zewnętrznych 250 x 300 mm i o masowym zapasie technologicznym wynoszącym 200-300 g na powłokę ochronną wkładu [80] i materiał redukujący odkształcenie podłoża.

Tabela 4.5. Zestawienie układów materiałowych w pakietach do prasowania

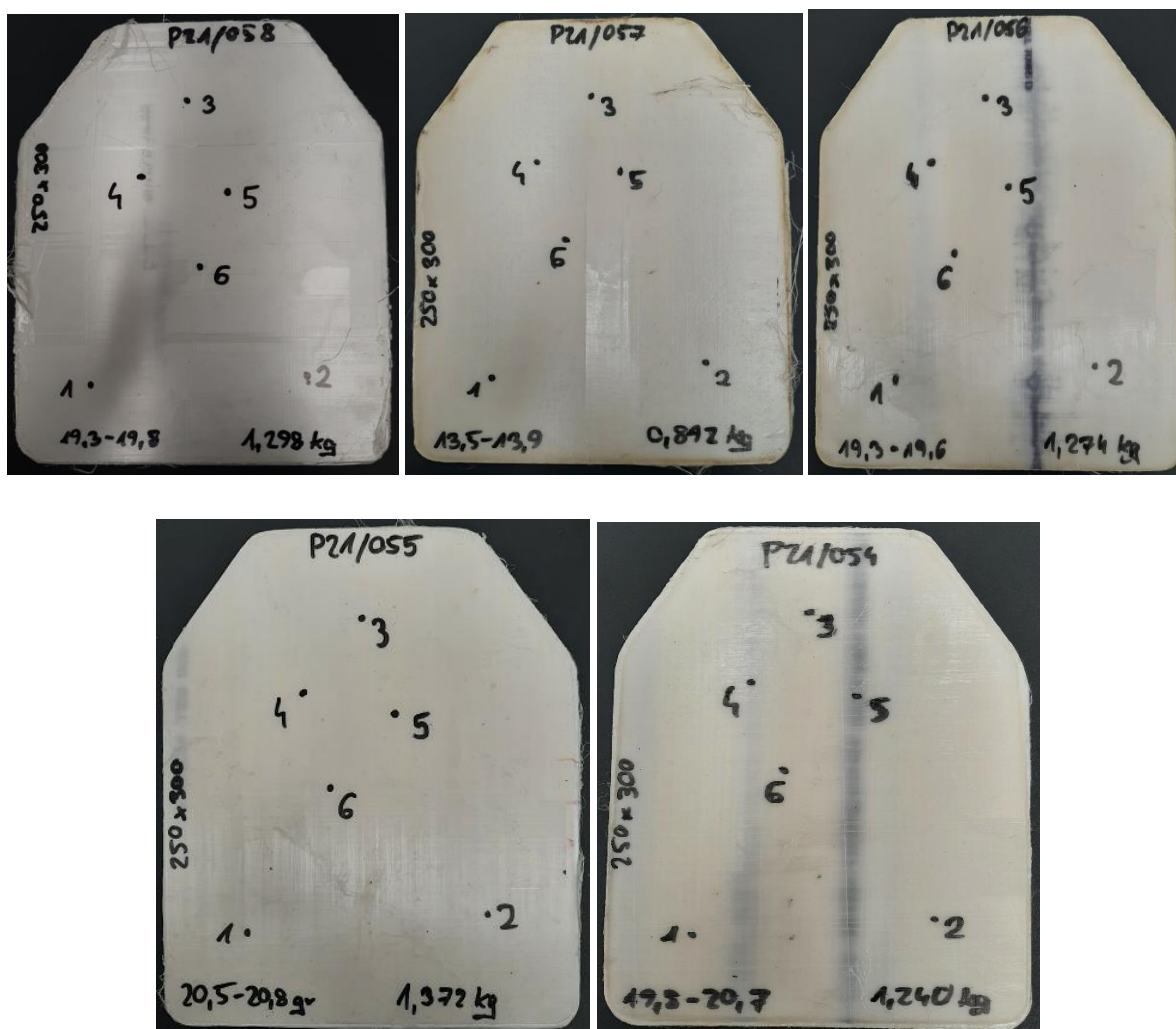
Material podstawowy	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Masa [g]
Teijin PE	299	250	32,0-36,0	1301,0
Honeywell PE	297	250	30,7	1360,0
DSM PE 1	298	250	24,8-26,6	1309,5
DSM PE 2	299	250	29,8-32,0	1395,5
DSM PE 3	299	250	17,0-17,9	898,0

W dalszym kroku technologicznym, po procesie wysokociśnieniowego prasowania z uwzględnieniem wymaganej temperatury oraz stosując odpowiednie przekładki technologiczne, wykonano modele uproszczonych rozwiązań konstrukcyjnych wkładów balistycznych. W tabeli 4.6 dokonano zestawienia wyników pomiarów geometrycznych i masowych przedmiotowych konstrukcji wkładów. Po sprasowaniu paneli zauważalny jest nieznaczny ubytek masy, który wiąże się z odparowaniem części składowych substancji klejowych,

Tabela 4.6. Zestawienie wyników pomiarów geometrycznych i masowych układów materiałowych po prasowaniu

Material podstawowy (numer próbki)	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość PE [mm]	Masa [g]
Teijin PE (P21/058)	300	251	19,3-19,8	1298
Honeywell PE (P21/054)	299	250	19,8-20,7	1240
DSM PE 1(P21/056)	299	248	19,3-19,6	1274
DSM PE 2 (P21/055)	298	250	20,5-20,8	1372
DSM PE 3 (P21/057)	300	249	13,5-13,9	842

Na każdy gatunek materiału wykonano partię 3 szt. paneli. Jednakże ze względu na fakt, że panele wykonano za pomocą nowej, wstępnie opracowanej technologii wytwórczej, niegwarantującej powtarzalności, a także ze względu na wysokie koszty materiałów i prowadzonych prac technologicznych, testy balistyczne realizowano na wyselekcjonowanych próbkach, po ocenie jakościowej struktury otrzymanego kompozytu. Ocena ta polegała na tym, że z każdej partii odrzucono próbki o stwierdzonej nieciągłości materiałowej na powierzchni zewnętrznej lub delaminacji warstw przypowierzchniowych. W ten sposób wybierano po jednej reprezentatywnej próbce wkładu do badań balistycznych zgodnie z normami NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000. Poniżej przedstawiono zdjęcia wytypowanych wkładów balistycznych (rys. 4.6).



Rys. 4.6. Wkłady balistyczne wstępnych (uproszczonych) modeli konstrukcyjnych po prasowaniu wysokociśnieniowym, trymowaniu krawędzi zewnętrznych i po wyselekcjonowaniu do badań balistycznych

4.3. Metody badawcze

Pierwszą z użytych w dysertacji metod badawczych, to metoda analityczna. Zastosowano ją w celu wskazania podstawowych parametrów wytrzymałościowych rozpatrywanych materiałów włóknistych i ich cech fizycznych, istotnych ze względu na ocenę (porównanie) ich właściwości balistycznych. Podstawowym źródłem danych do przeprowadzenia analizy były karty techniczne włóknistych materiałów bazowych i zestawienia opracowane w ramach przeglądu literaturowego. Zgromadzone dane zostały przedstawione w formie zestawienia w tabelach 4.1 i 4.2, które to dane wykorzystano w trakcie analizy porównawczej materiałów bazowych.

Kolejne wykorzystane metody badawcze to techniki eksperymentalne, które posłużyły do oceny właściwości fizyko-mechanicznych materiałów włóknistych oraz oceny odporności balistycznej opracowanych wkładów ochronnych (określenie parametru V_{50}). Testy balistyczne, których celem było sprawdzenie spełnienia wymaganej klasy ochronnej posłużą do weryfikacji końcowej konstrukcji wkładu, natomiast badania określające poziom odłamko-odporności posłużą do analizy charakterystyk fizyko-mechanicznych tkanin w zależności od osiąganych parametrów balistycznych. Stosunkowo dużo artykułów [2, 32, 78, 79] wskazuje na różne opisy mechanizmu odporności balistycznej dla różnych typów włókien. Najczęściej jednak poza oceną parametrów fizycznych jak: wytrzymałość na zerwanie, moduł sprężystości i wydłużenie przy zerwaniu, a także odkształcalność pocisku oraz prędkość poprzecznych fal uderzeniowych włókna, stosowane są badania bazujące na bezpośrednich testach balistycznych z użyciem odłamka lub innych określonych kształtów pocisku (cylinder, stożek, kula itp.).

4.3.1. Badanie quasi-statyczne – układ badawczy

Metodyka badań porównawczych włóknistych materiałów stosowanych na zbrojenie laminatów balistycznych

Wyniki prac Staniszewskiego [10] wykazują zgodność modelu numerycznego z wynikami badań eksperymentalnych. Zarówno opracowana przez niego metodyka, opisana w rozdziale 1.3, jak i norma ASTM 7136 [81] odnoszą się jednak do finalnych laminatów (tkanin UHMWPE poddanych procesowi prasowania w zadanej temperaturze). Podczas przeglądu literatury nie znaleziono porównywalnej metody eksperymentalnej, mogącej posłużyć ocenie materiałów balistycznych na poziomie materiału bazowego czyli tkaniny. W tej części pracy zostanie przedstawiona próba modyfikacji metody Staniszewskiego i opracowania procedury

badawczej polegającej na quasi-statycznym obciążaniu zaokrąglonym penetratorem, próbek wykonanych z tkanin balistycznych. Celem badania jest dokonanie oceny porównawczej wytypowanych tkanin lub układów tkanin na podstawie krzywych doświadczalnych opisujących zmianę siły krzywych nacisku penetratora w funkcji ugięcia warstwy materiału włóknistego.

Główne założenia metodyczne badań quasi-statycznych materiałów włóknistych

Przyjęto następujące założenia dla opracowanej metody badawczej:

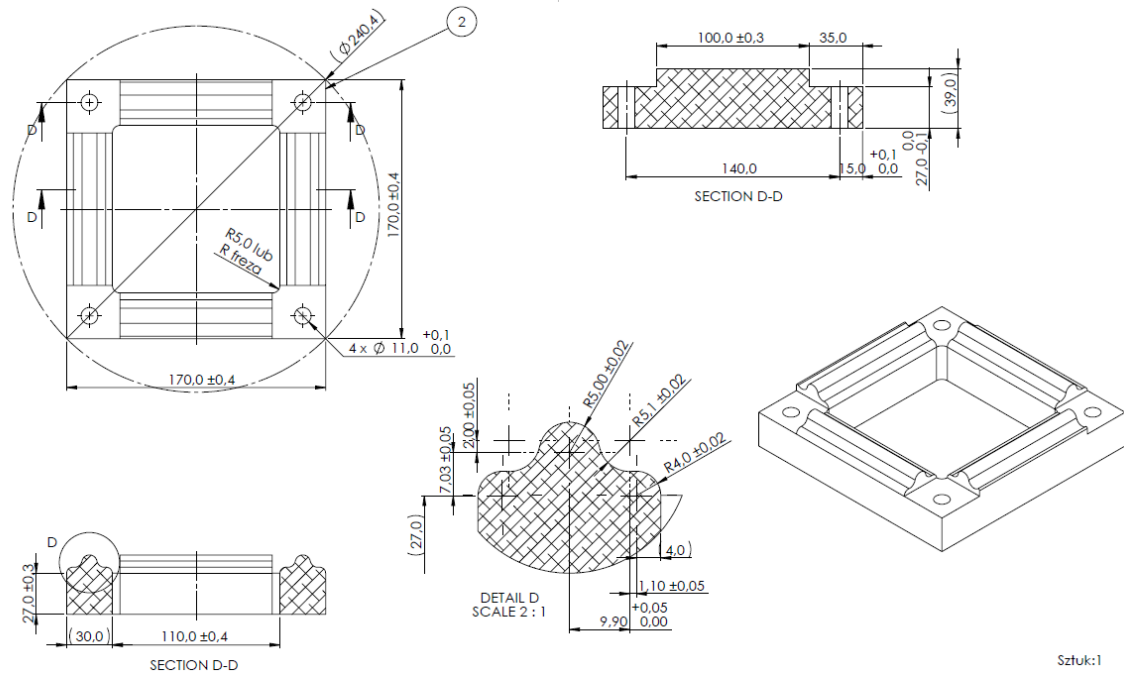
- Celem badania jest pozyskanie danych wstępnych do projektowania konstrukcji balistycznych, które charakteryzują zachowanie się badanej tkaniny w przyjętych warunkach obciążenia.
- Badanie tkaniny będzie przeprowadzone w warunkach quasi-statycznego obciążenia (<0,05 mm/s).
- Przygotowanie próbek musi uwzględniać kierunkowość ułożenia włókien.
- Mocowanie próbek realizowane w układzie samonaprzężającym ma zapewnić możliwie jak najwyższą powtarzalność badań.

Konstrukcja stanowiska i oprzyrządowania

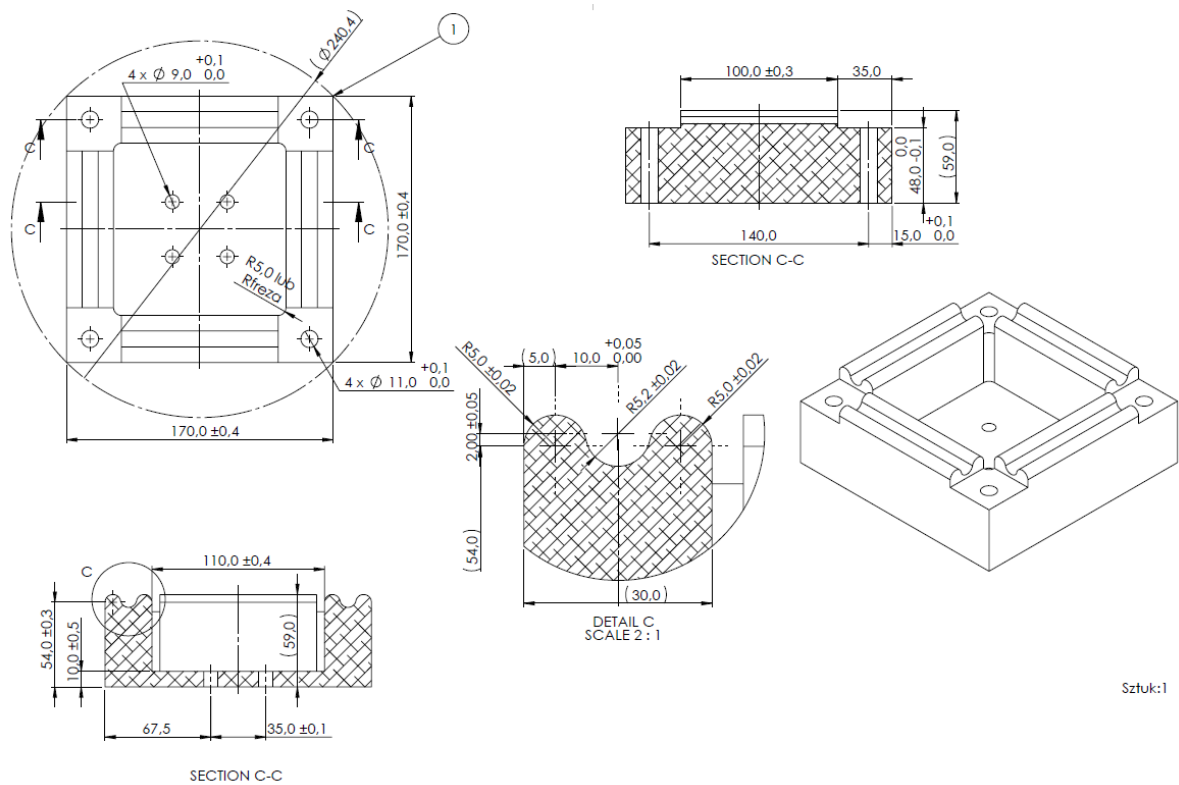
Do przeprowadzenia badań przewidziano maszynę wytrzymałościową MTS Criterion Model 45. Na podstawie analizy rozwiązań konstrukcyjnych mocowań maszyny wytrzymałościowej zostały zaprojektowane narzędzia oraz uchwyty spełniające ww. założenia metody i gwarantujące poprawną i powtarzalną realizację badań (rysunki konstrukcyjne zawarte w załączniku nr. 7)

Poszczególne etapy procesu projektowania uchwytów i przygotowania stanowiska do badań próbek materiałów włóknistych przedstawiono poniżej:

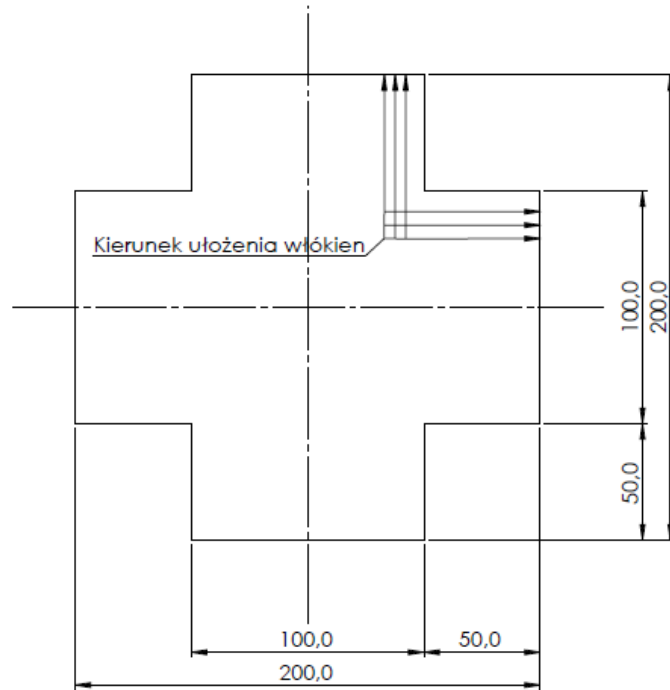
- 1) Zaprojektowanie uchwytu mocującego próbkę materiału włóknistego (składającego się z części górnej – rys. 4.7 i dolnej – rys. 4.8).
- 2) Zaprojektowanie i wykonanie próbki materiału włóknistego o zdefiniowanych wymiarach i kształcie (rys. 4.9).
- 3) Opracowanie różnych wariantów penetratorów / narzędzi (rys. 4.10):
- 4) Wykonanie układu badawczego na podstawie opracowanej dokumentacji (rys. 4.11) oraz jego montaż w przestrzeni roboczej maszyny wytrzymałościowej (rys. 4.12).



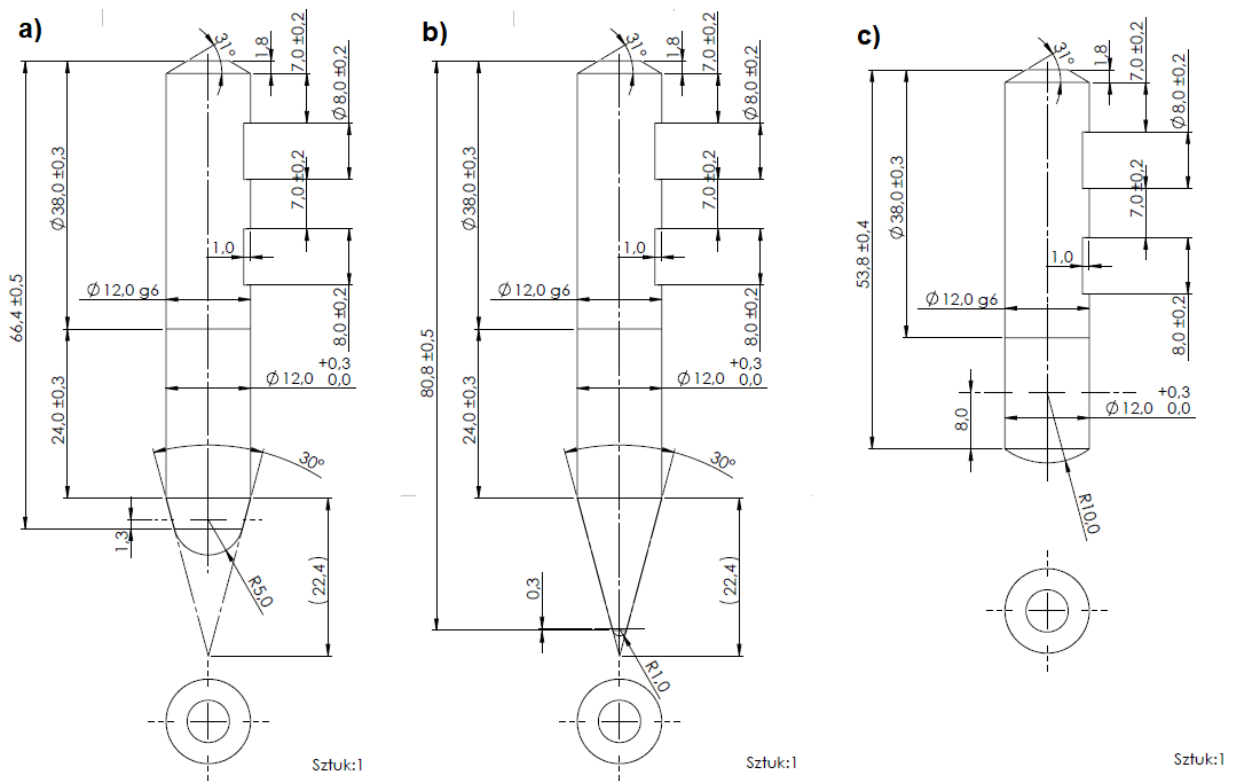
Rys. 4.7. Układ mocujący próbkę z systemem samo-naciągu – część górna



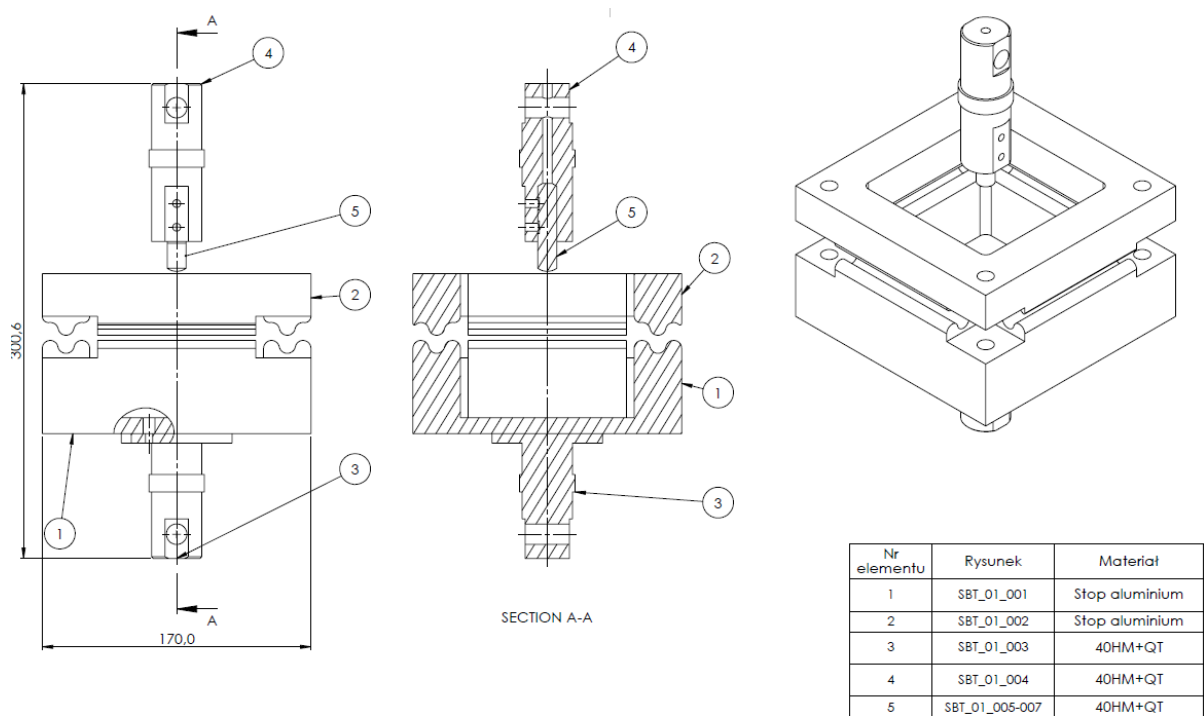
Rys. 4.8. Układ mocujący próbkę z systemem samo-naciągu – część dolna



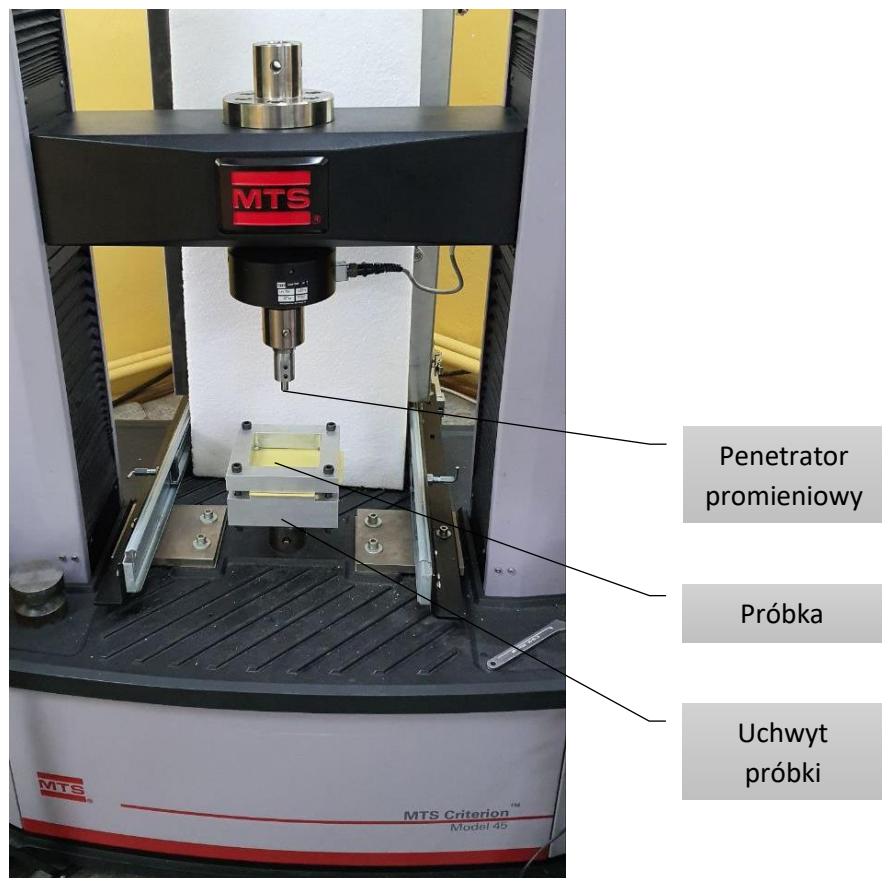
Rys. 4.9. Nominalny kształt i wymiary próbki pojedynczej warstwy materialu włóknistego



Rys. 4.10. Narzędzia do punktowego obciążenia tkaniny (penetratorów) o promieniu:
a) R = 5 mm; b) R = 1 mm; c) R = 10 mm



Rys. 4.11. Rysunek złożeniowy układu mocowania tkaniny balistycznej



Rys. 4.12. Widok układu mocowania tkaniny balistycznej zamocowanego na maszynie wytrzymałościowej

Procedura badań quasi-statycznych tkanin włóknistych jako zbrojenie laminatu balistycznego

Przebieg procedury badawczej za pomocą wyżej przedstawionego układu badawczego jest następujący:

- Próby przeprowadzić w temperaturze 20⁰C, jednak nie wyższej niż 30⁰C i nie niższej niż 10⁰C.
- Przed próbą sprawdzić wykonanie i wymiary próbek. Pomiaru dokonać suwmiarką o dokładności pomiarowej 0,01 mm. Należy ocenić czy dana próbka została wykonana zgodnie z rysunkiem (rys. 4.12.), sprawdzić kierunkowość włókien oraz zmierzyć masę próbki na wadze o dokładności 0,01g
- Wszelkie zapisy należy prowadzić w opracowanej tabeli (tabela 4.7.)

Tabela 4.7. Tabela zestawienie wyników pomiarów próbek i przeprowadzonych prób

Nazwa Próbki	Układ	Masa próbki [g]	Gęstość powierzchniowa układu [kg*10 ⁻³ /m ²]	Maksymalna siła obciążająca [N]	Energia odkształcenia [J]
<i>Próbka 1</i>	<i>1 warstwa</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>	<i>0,0</i>
...					

- Przygotowanie maszyny wytrzymałościowej - zainstalować trzpienie do układu mocującego próbkę oraz narzędzie.
- Próbkę umieścić na części dolnej układu w sposób przedstawiony na rys. 4.13.
- Próbkę docisnąć poprzez część górną, zamykającą.
- Układ skrócić za pomocą śrub M10 poprzez podkładki mocujące. Należy użyć klucza dynamometrycznego ustawionego na moment skręcenia 50 Nm.
- Obciążyć siłą osiową w punkcie centralnym próbki materiału włóknistego. Badanie należy przeprowadzić ze stałą prędkością trawersy wynoszącą 0,04 mm/s oraz częstotliwością próbkowania wielkości siły i przemieszczenia trawersy co 0,1 s do momentu penetracji próbki lub ugięcia wynoszącego maksymalnie 35 mm.
- Wyznaczyć maksymalną siłę obciążającą.
- Wyznaczyć energię odkształcenia zgodnie z zależnością (4.4).

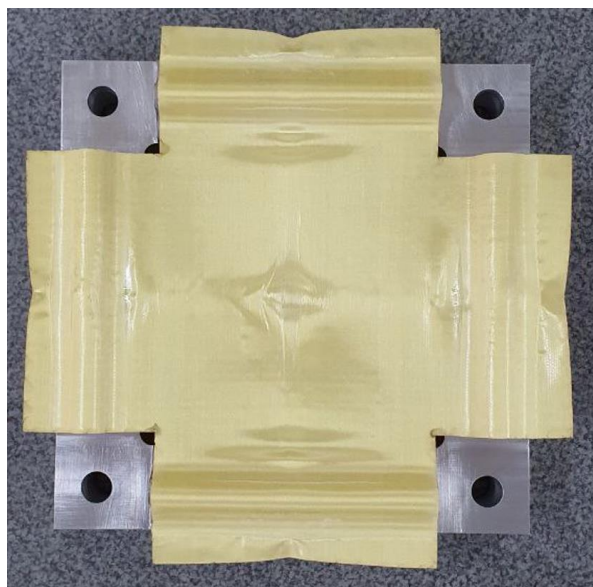
$$E_o = \int_0^{\varepsilon_{max}} F(\varepsilon)d\varepsilon \quad (4.4)$$

E_o – Energia odkształcenia

$F(\varepsilon)$ – funkcja krzywej quasi-statycznej siły obciążającej

ε_{max} – ugięcia próbki dla maksymalnej siły obciążającej

- Opracować wyniki i wykonać raport z badań na podstawie danych zawartych w tabeli 4.7.



Rys. 4.13. Zdjęcie ułożenia próbki na części dolnej układu mocującego próbkę

4.3.2. Metodyka badania odłamko-odporności

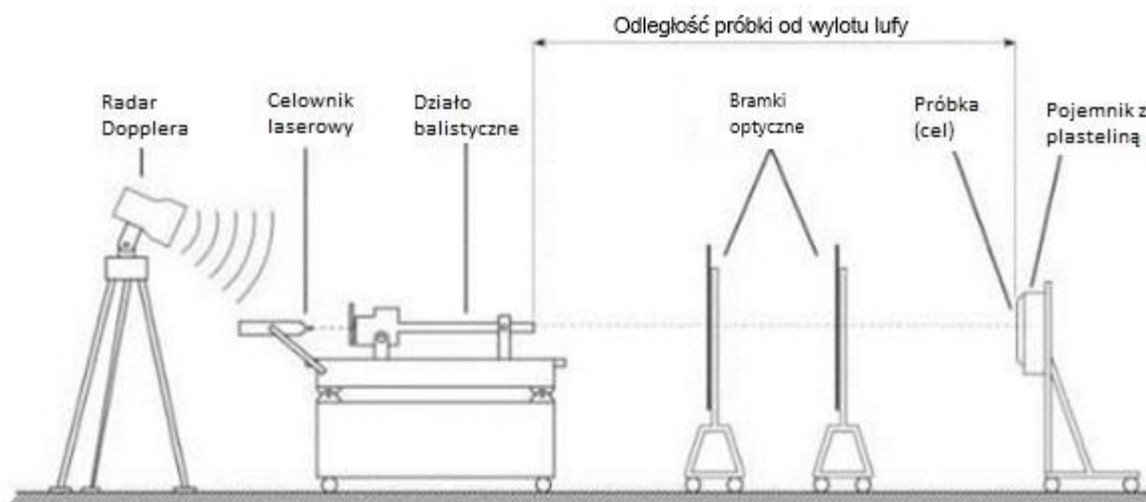
W celu dokonania oceny ilościowej odporności balistycznej poszczególnych włóknistych materiałów bazowych zaplanowano testy na odporność balistyczną V_{50} w oparciu o normę STANAG 2920 (procedurę AEP-2920) [7]. Badanie to stanowi bazę dla oceny właściwości balistycznych wytypowanych włóknistych materiałów bazowych. W dalszej części niniejszej rozprawy, metodyka ta zostanie wykorzystana do porównania materiałów bazowych, przewidzianych do produkcji twardych wkładów kamizelkowych oraz poznania mechanizmów zniszczenia i sposobów przenoszenia obciążeń.

Poniżej przedstawiono najważniejsze punkty procedury badawczej wyznaczania parametru V_{50} według STANAG 2920:

- 1) Testy balistyczne bazują na podejściu polegającym na określeniu prawdopodobieństwa całkowitej penetracji osłony (np. miękki i/lub twardy pancerz, elementy pancerza osobistego, komponenty lub próbki materiałów) w określonym zakresie prędkości

uderzenia pocisku o jednoznacznie zdefiniowanych parametrach fizycznych i geometrycznych. Obowiązują kryteria dotyczące maksymalnych odległości między poszczególnymi trafieniami. Wymagania uznaje się za spełnione, gdy parametr V_{50} (graniczna prędkość balistyczna) dla określonego pocisku jest równy lub przekracza prędkość określoną jako minimalną wartość parametru V_{50} dla danego poziomu ochrony balistycznej.

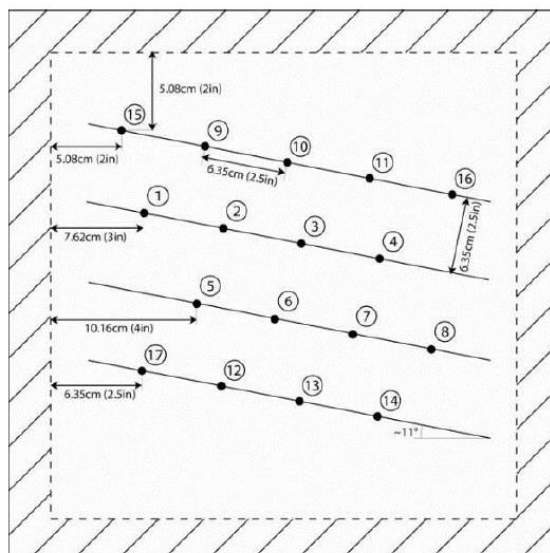
- 2) Testy muszą być prowadzone w układzie i z wykorzystaniem dedykowanej infrastruktury i aparatury pomiarowej. Schemat stanowiska badawczego do wyznaczania wartości parametru V_{50} przedstawiono na rys. 4.14.



Rys. 4.14. Schemat stanowiska eksperymentalnego stosowanego do badań balistycznych na odporność balistyczną V_{50}

- 3) Do pomiaru prędkości należy stosować układy pomiarowe, które podlegają wzorcowaniu i spełniają wymogi dokładności w zakresie ± 2 m/s, np.:
- radar dopplerowski
 - bramki pomiarowe na podczerwień
 - bramki pomiarowe optyczne
 - bramki pomiarowe zwarciove/rozwarciowe
- 4) Wyznaczanie parametru V_{50} odbywa się zgodnie z poniższym schematem:
- a) Do obliczeń należy użyć parzystej liczby strzałów, co najmniej sześciu.
 - b) Wyznaczenie trzech strzałów bez pełnego przebicia (PP) o największej zarejestrowanej prędkości uderzenia.
 - c) Wyznaczenie trzech strzałów z pełnym przebiciem (CP) z najniższą zarejestrowaną prędkością uderzenia.

- d) Różnica prędkości uderzenia między najniższym zarejestrowanym CP a najwyższym zarejestrowanym PP nie może przekraczać rozrzutu 40 m/s. Oznacza to, że trzy najwyższe PP i trzy najniższe CP mieszczą się w przedziale rozrzutu 40 m/s.
 - e) Obliczenie wartości V_{50} jako średniej arytmetycznej grupy prędkości, pod warunkiem, że wszystkie sześć prędkości uderzenia mieszczą się w przedziale rozrzutu 40 m/s.
 - f) Jeżeli ten warunek nie jest spełniony, badanie należy kontynuować, aż pięć najwyższych PP i pięć najniższych CP mieści się w przedziale rozrzutu 50 m/s.
 - g) Obliczenie średniej arytmetycznej V_{50} dla tej grupy prędkości, pod warunkiem, że wszystkie dziesięć prędkości mieści się w przedziale rozrzutu 50 m/s.
 - h) Jeżeli różnica prędkości uderzenia między najwyższym PP a najniższym CP przekracza 50 m/s, badanie należy kontynuować, dopóki siedem najwyższych PP i siedem najniższych CP nie mieści się w przedziale rozrzutu 60 m/s.
 - i) V_{50} jest wtedy średnią arytmetyczną tej grupy prędkości, pod warunkiem, że wszystkie czternaście prędkości mieści się w przedziale rozrzutu 60 m/s.
 - j) Jeżeli różnica prędkości uderzenia między najwyższym PP a najniższym CP przekracza rozrzutu 60 m/s, badanie należy przerwać. W tym momencie konieczne staje się ponowne badanie układu materiałowego.
 - k) W obliczeniach V_{50} stosuje się pierwszy zestaw strzałów uznanych za zgodne (Fair – hit), które spełniają kryteria wymienione powyżej. Wyniki spoza zakresu dopuszczalnego przedziału mogą być wykorzystane do uzyskania dodatkowych informacji (np. odchylenia standardowego), ale nie mogą być uwzględniane w obliczeniach V_{50} .
- 5) Odległość pomiędzy miejscami uderzenia pocisków, a krawędzią próbki, nie może być mniejsza niż 25 mm, obszar ten określa się jako obszar nieklasyfikowany. Podobnie, żadne uderzenie pocisku nie może być w odległości mniejszej niż 50 mm od narożnika. Minimalny odstęp między dwoma strzałami powinien wynosić 65 mm lub 10-krotność kalibru pocisku, w zależności od tego, który z nich jest większy.



Rys. 4.15. Przykład wzoru ostrzału do miękkiej próbki odłamkiem standardowym [16]

6) Norma dopuszcza różne pociski lub odłamki, które zostały w niej zdefiniowane. W ramach prac objętych zakresem niniejszej rozprawy zastosowano odłamek standardowy o masie 1.1 g, którego rysunek konstrukcyjny przedstawiono w rozdziale pierwszym (rys. 1.1).

4.3.3. Metodyki badania odporności balistycznej

W rozdziale pierwszym opisano najczęściej stosowane normy balistyczne służące do klasyfikacji i oceny paneli ochronnych stosowanych w kamizelkach kuloodpornych. Wytypowane procedury zgodne z normami badawczymi NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000, posłużą do dokonania końcowej oceny demonstratorów technologicznych wkładów balistycznych. Poziomy odporności balistycznej, określone przez inne światowe normy, możemy znaleźć także w rozdziale pierwszym. Poniżej przedstawiono zestawienie porównujące metodyki badawcze bazujące na normach NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000 (patrz tabela 4.8).

Tabela 4.8. Porównanie procedur oceny wg NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000 [14, 15]

NIJ 0101.06	PN-V-87000
Warunki przeprowadzenia badań	
Temperatura: 21 °C ± 2.9 °C Wilgotność względna powietrza: 50 % ± 20 %.	Temperatura: 25 °C ± 10 °C Wilgotność względna powietrza: 50 % ± 20 %.

Podłoże i jego przygotowanie	
<p>Plastelina: Roma No 1 Podłoże w skrzyni 610 x 610 mm i głębokości 140mm (tolerancja +/-2 mm), Dno skrzyni - wymienna płyta drewniana lub sklejka 19,1 mm. Kondycjonowanie poprzez wygrzewanie do osiągnięcia wymaganych parametrów podłoża. Badanie ciężarkiem stalowym, kulą o średnicy 63,5 +/- 0,05 mm, masie 1043 g +/- 5 g). Wysokość zrzutu ciężarka 2 m. Należy wykonać pięć prób zagłębienia się ciężarka, przy czym środki zagłębień powinny być odległe od siebie o 152 mm i od krawędzi bocznej o co najmniej 76 mm. Średnia arytmetyczna zmierzonych głębokości musi zawierać się w wymiarze 19 mm +/- 2 mm. Dodatkowo żaden z pomiarów nie może być większy niż 22 mm i mniejszy niż 16 mm. Podłoże musi spełniać wymagania przed i po teście danej próbki, dlatego bada się je ponownie, niezwłocznie po ostrzale danej próbki.</p>	<p>Plastelina lub glina Kondycjonowanie podłoża w temperaturze od 150C do 300C w celu osiągnięcia wymaganych parametrów. Badanie ciężarkiem stalowym o średnicy 44 +/- 0,5 mm, masie 1 +/- 0,01 kg) i zakończeniu półkolistym. Po zrzuceniu z 2 +/- 0,02 m na podłoże o grubości co najmniej 100 mm, zagłębienie na głębokość 25 +/- 3 mm. Należy wykonać co najmniej trzy próby zagłębienia się ciężarka, przy czym środki zagłębień powinny być odległe od siebie i od krawędzi bocznej o co najmniej 76 mm. Przy zachowaniu wymaganej temperatury i wilgotności powietrza nie jest wymagane powtórne badanie podłoża.</p>
Weryfikacja wyników	
<ul style="list-style-type: none"> • Strzał uznaje się za pozytywny, jeżeli w efekcie oddanych strzałów nie nastąpiła perforacja (tj. całkowita penetracja), a głębokość wgniecenia podłoża nie przekroczyła wartości dopuszczalnej tj. 44 mm • Odległość pomiędzy strzałami nie mniejsza niż 51 mm. • Pomiar wgniecenia podłoża BFS odbywa się w zależności od poziomu ochrony po 1 i 2 lub po 1,2 i 3 strzale. • Dla ostrzału poziomów pistoletowych dodatkowo prowadzi się ostrzał kątowy. 	<ul style="list-style-type: none"> • Strzał uznaje się za pozytywny, jeżeli w efekcie oddanych strzałów nie nastąpiła perforacja (tj. całkowita penetracja), a głębokość wgniecenia podłoża nie przekroczyła wartości dopuszczalnej tj. 40 mm • Odległość pomiędzy strzałami nie mniejsza niż 50 mm. • Pomiar wgniecenia podłoża odbywa się po każdym strzale. • Dla ostrzału poziomów pistoletowych dodatkowo prowadzi się ostrzał kątowy.
Ocena dodatkowych parametrów	
<ul style="list-style-type: none"> • Test limitu balistycznego (<i>ang. Ballistic limit</i>) z użyciem danego pocisku • Kondycjonowanie w określonych warunkach. • Test starzenia poprzez wirowanie (tumbling) • Odporność na upadek (Drop test) 	<ul style="list-style-type: none"> • Odłamkoodporność standardowym odłamkiem 1,1 g i wyznaczenie V_{50} • Kondycjonowanie w określonych warunkach. • Nadzorowana jest: jakość, oznaczenie, wygląd, elastyczność, ukończenie, niezawodność, wymagania konstrukcyjne

ROZDZIAŁ V

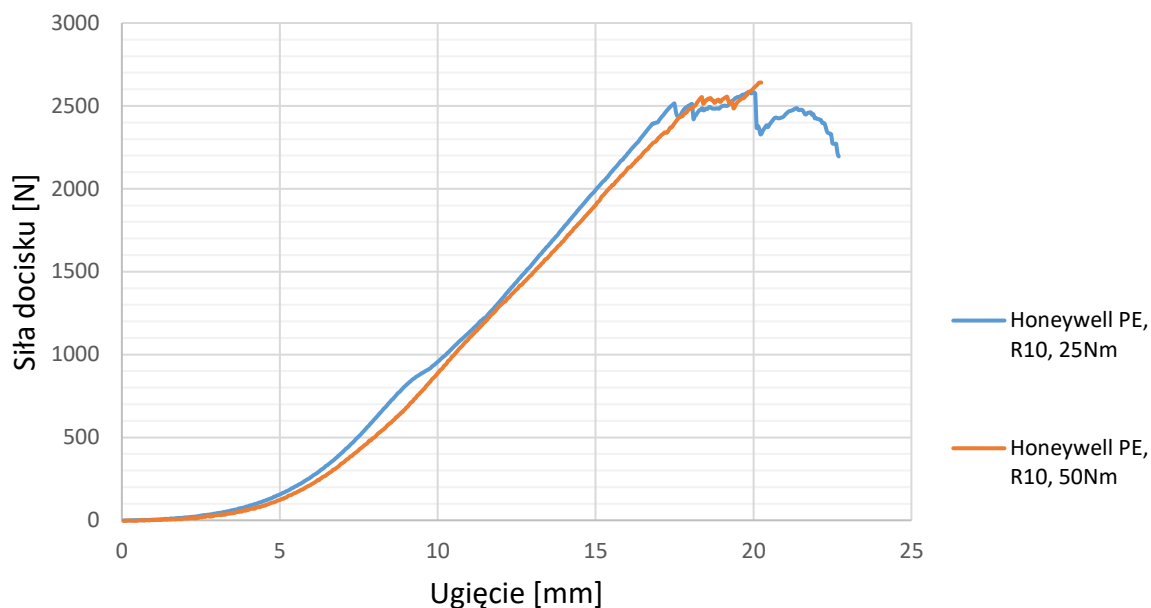
Wyniki badań własnych i ich analiza

W rozdziale przedstawiono wyniki i ich analizę dla wszystkich zrealizowanych badań materiałów i konstrukcji kompozytowych przewidzianych do produkcji lekkich wkładów balistycznych. Wyniki badań własnych opisano z zachowaniem chronologii procesu konstruowania i optymalizacji wkładów ochronnych, zaczynając od badań quasi-statycznych tkanin zbrojenia kompozytu, poprzez badania balistyczne kolejnych wersji rozwojowych konstrukcji wkładów balistycznych, a na końcowej wersji prototypu wkładu balistycznego kończąc. Podczas analizy zastosowano metodę porównawczą, tj. porównano osiągnięte parametry fizyko-mechaniczne z wymaganiami założonymi dla konstrukcji, a następnie eliminowano konstrukcje o najniższym współczynniku rokowania. W podsumowaniu rozdziału zostały zawarte także wnioski sformułowane na tym etapie rozważań badawczych.

5.1. Weryfikacja stanowiska do badań quasi-statycznych

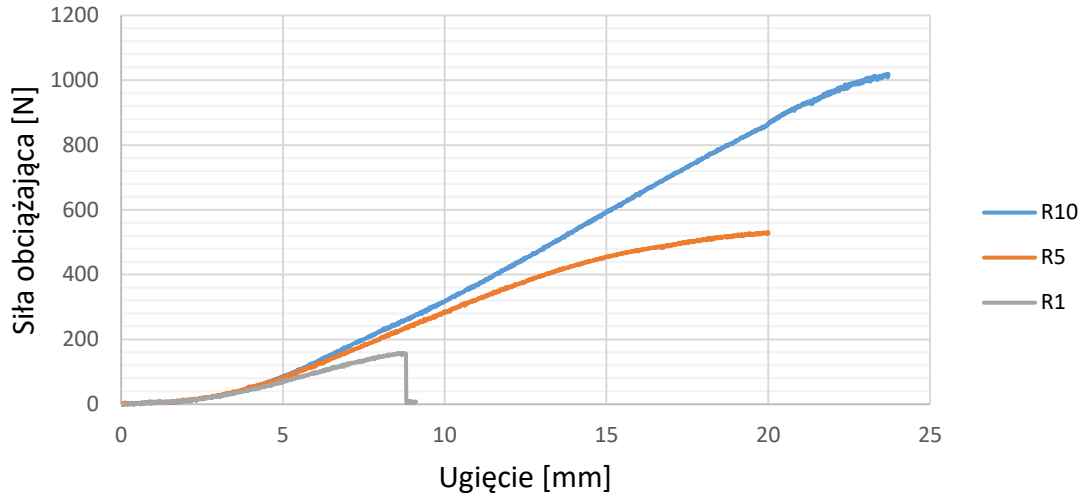
Układ badawczy do badania tkanin zbrojenia wkładów balistycznych poddano wstępnym próbom sprawdzającym w celu określenia warunków obciążenia i weryfikacji użytych narzędzi. Poniżej przedstawiono wnioski i wstępne wyniki otrzymane na podstawie przeprowadzonych prób sprawdzających:

- System naciągu próbki spełnił oczekiwania, tj. naciąg próbki był silny, powtarzalny oraz równomierny na całej powierzchni roboczej próbki.
- Powtarzalność zamocowania próbki ma duże znaczenie ze względu na jakość otrzymywanych wyników, w związku z czym określono stały moment dokręcania czterech śrub poprzez podkładki stalowe. Ustalono, że moment dokręcania powinien być nie mniejszy niż 50 Nm, oraz taki sam dla każdej śruby naróżnej. Dla momentu dociskowego próbki na poziomie 25 Nm widoczny jest wpływ wyciągania próbek (rys. 5.1), tj. skokowy charakter obciążenia próbki, wynikający z braku docisku poszczególnych włókien tkaniny. Zauważalny jest również wpływ momentu dociskowego na wartość siły zrywającej włókna. Dla poprawnie zamontowanej próbki (>50 Nm) siła ta jest ok 7% wyższa niż dla próbki dokręconej momentem 25 Nm.



Rys. 5.1. Zestawienie wpływu docisku próbki (25 Nm i 50 Nm) na przebieg ugięcia o zadanym obciążeniu z wykorzystaniem narzędzia R10

- W ramach badań sprawdzających dokonano weryfikacji metody w zakresie użytych penetratorów. Przeprowadzono test na próbce tego samego gatunku o oznaczeniu Teijin UD. Na rys 5.2. przedstawiono wyniki badań penetratorami o promieniach zaokrąglenia R1, R5 i R10. Dla promieni zaokrąglenia R1 oraz R5 następuje stosunkowo szybkie rozdzielanie włókien. Stąd ocena ich mechanicznego zachowania może być niejednoznaczna. W przypadku penetratora o promieniu zaokrąglenia R10, krzywa obciążenia charakteryzuje się stosunkowo długim odcinkiem opisującym równomierne ugięcie badanej tkaniny, co pozwala na lepszą ocenę mechanicznej odpowiedzi materiału, w tym również określenie jego maksymalnej wytrzymałości. W związku z powyższym ostatecznie badania porównawcze przeprowadzone zostały z użyciem narzędzia R10, którego zastosowanie pozwoliło na wyodrębnienie poszukiwanych danych.



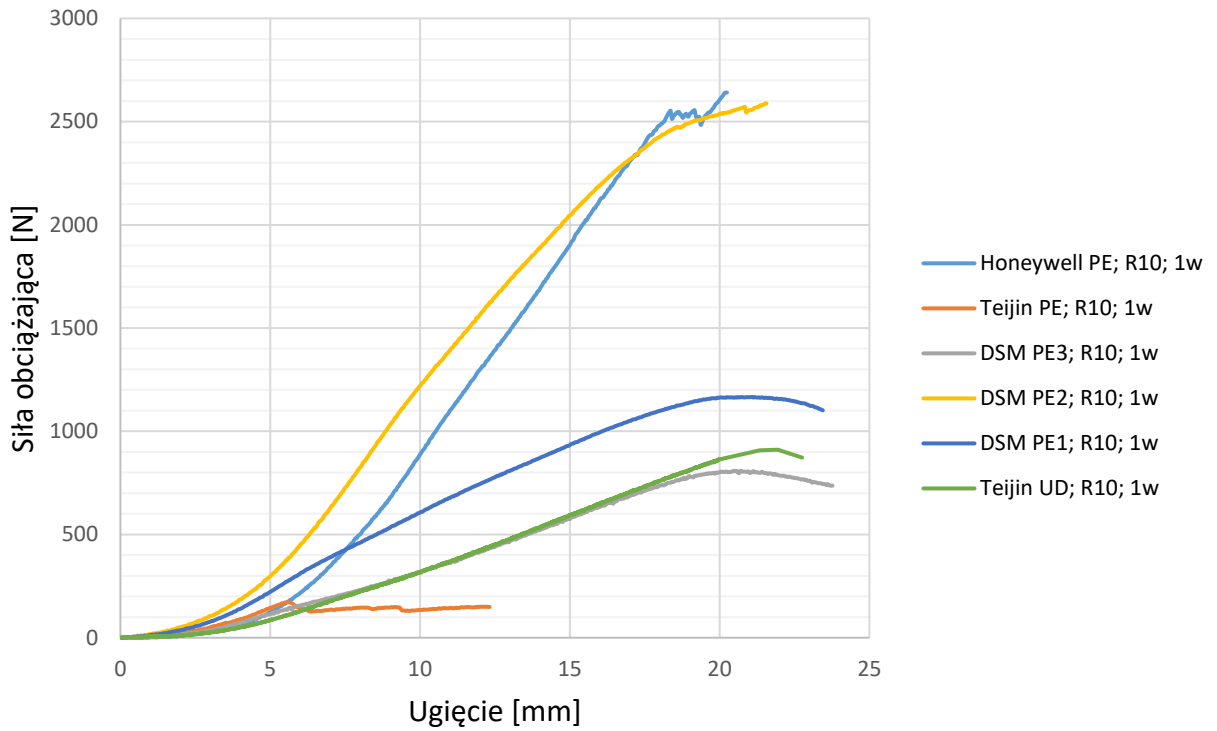
Rys. 5.2. Wpływ różnych narzędzi do badania poprzez obciążenie punktowe próbki Teijin UD

Na podstawie przeprowadzonych badań sprawdzających należy uznać, że stanowisko do badań quasi-statycznych zostało przygotowane prawidłowo i pozwala w sposób zgodny z założeniami przeprowadzać badania obciążeniowe. Należy jednak zwrócić uwagę na krytyczne elementy techniki badawczej takie jak: sposób przygotowania próbki z prawidłową orientacją włókien, właściwy docisk tkaniny w uchwycie oraz wybór właściwego penetratora w stosunku do badanego materiału.

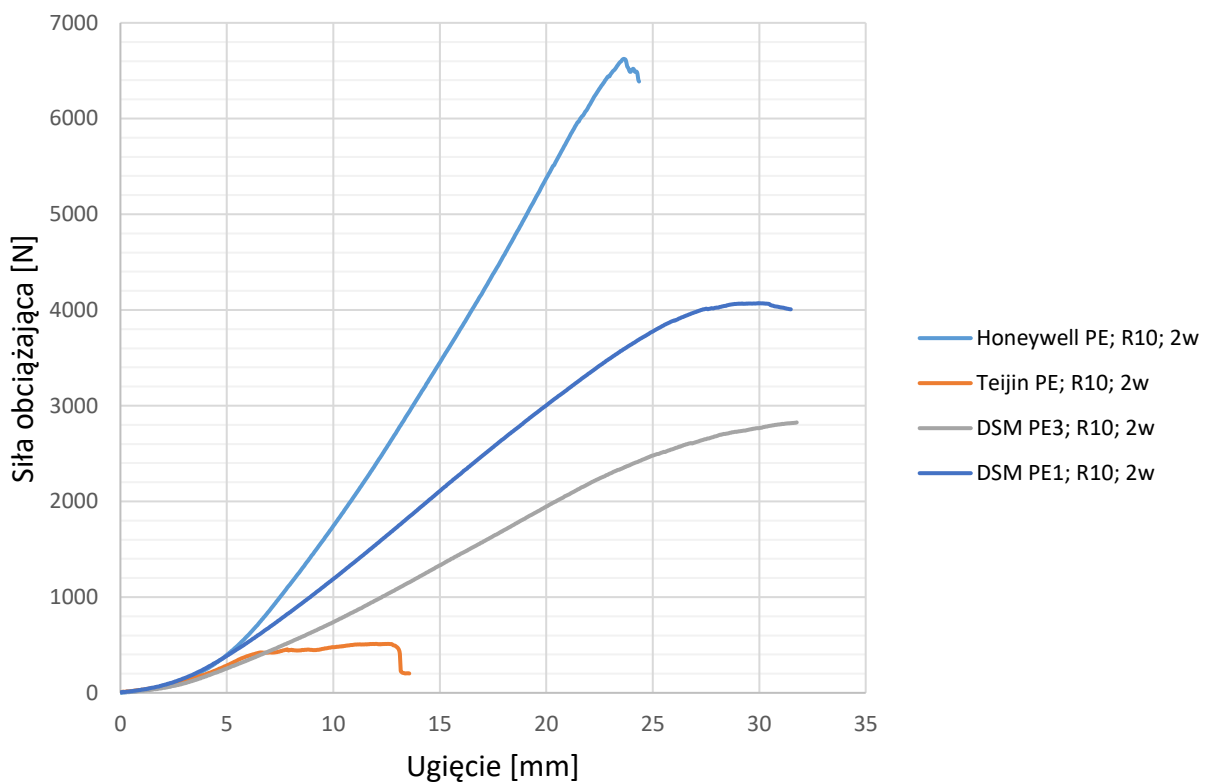
5.2. Quasi-statyczne badania wytypowanych tkanin balistycznych

W celu porównania cech wytrzymałościowych wytypowanych tkanin balistycznych (patrz rozdział 4.2.1, tabela 4.3), przeprowadzone zostały badania eksperymentalne na podstawie opracowanej metodyki przytoczonej w podrozdziale 4.3.1. Badania wykonano dla różnych typów próbek w układzie jednej warstwy – 6 typów próbek oraz dwóch warstw – 4 typy próbek. Dla każdego typu materiału próbki wykonano 3 zestawy próbek do badań. Wyniki badań dla każdego typu próbki uśredniano. Wszystkie próby zostały wykonane z użyciem penetratora o promieniu zaokrąglenia R10.

Wyniki zapisów z maszyny MTS Criterion Model 45 zostały przedstawione w formie krzywych siła obciążająca-ugięcie dla układu jednowarstwowego (rys. 5.3) i dwuwarstwowego (rys. 5.4). Z kolei, wybrane dane opisujące właściwości fizyczne materiałów badanych oraz wyniki badań własnych zestawiono w tabeli 5.1.



Rys. 5.3. Zestawienie wyników dla próbek w układzie 1 warstwy



Rys. 5.4. Zestawienie wyników dla próbek w układzie 2 warstw

Tabela 5.1. Tabelaaryczne zestawienie wyników pomiarów próbek i przeprowadzonych prób

Nazwa Próbkki	Układ	Masa próbkki [g]	Gęstość powierzchniowa materiału [$\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$]	Maksymalna siła obciążająca [N]	Energia odkształcenia [J]
Teijin PE	1 warstwa	10,3	146	167	0,311
Teijin UD	1 warstwa	17,0	246	910	8,798
Honeywell PE	1 warstwa	17,5	257	2482	16,104
DSM PE 1	1 warstwa	16,2	233	1162	11,650
DSM PE 2	1 warstwa	18,1	264	2537	24,130
DSM PE 3	1 warstwa	9,4	136	796	7,552
Teijin PE	2 warstwy	20,6	146	498	4,078
Honeywell PE	2 warstwy	35	257	6532	64,195
DSM PE 1	2 warstwy	32,4	233	4067	59,145
DSM PE 3	2 warstwy	18,8	136	2822	45,541

Na podstawie wyżej przedstawionych rezultatów można stwierdzić, że zauważalne są trzy fazy procesu obciążenia tkaniny tj. wstępnego naciągu materiału, pracy pod obciążeniem oraz zrywanie włókien. W pierwszej fazie, charakter krzywej obciążenie-ugięcie jest wyraźnie nieliniowy, natomiast materiał w fazie pracy pod obciążeniem wykazuje pewną liniowość odpowiedzi mechanicznej.

Dla próbek w układzie jednowarstwowym, tkanina DSM PE 2 charakteryzowała się największą uśrednioną siłą potrzebną do przerwania włókien, która wynosiła ok. 2 537 N przy ugięciu na poziomie 20,12 mm. Natomiast próbką o największym ugięciu w chwili zerwania włókien jest Teijin UD o wartości ugięcia ok. 22 mm przy sile obciążającej bliskiej 910 N.

W przypadku próbek w układzie dwuwarstwowym, najwyższą siłę przy zerwaniu włókien również odnotowano dla próbek Honeywell PE o wartości ok. 6532 N, przy ugięciu na poziomie 24 mm. Ugięcie o najwyższej wartości 31,7 mm odnotowano dla próbek DSM PE3 przy obciążeniu siłą około 2822 N.

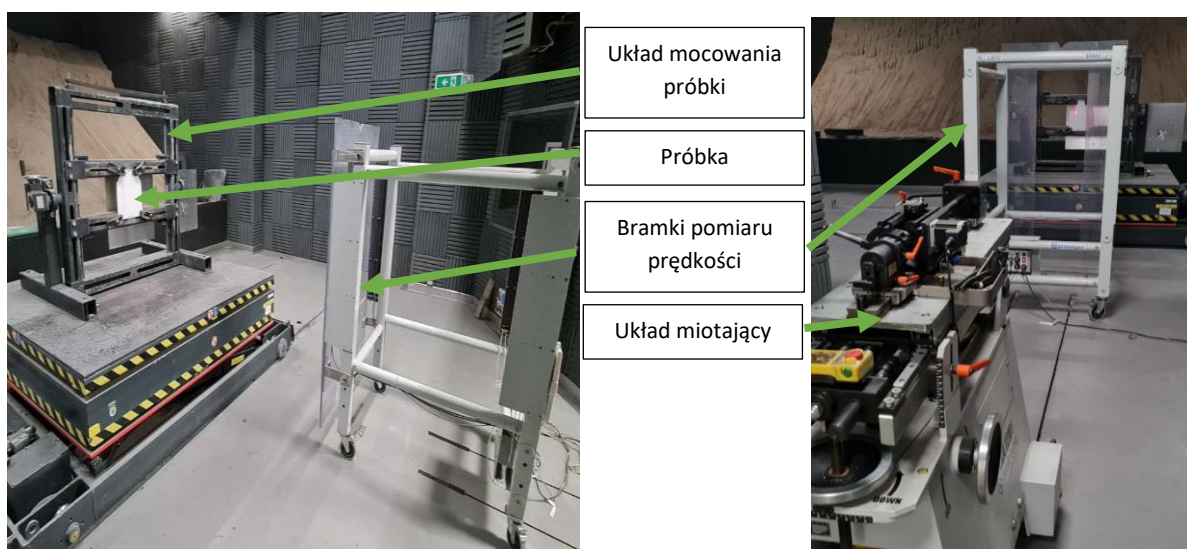
Największą wartość energii odkształcenia, dla próbek w układzie jednowarstwowym, wyznaczono dla materiału DSM PE 2 (24,130 J), natomiast najniższą wartość dla próbek materiału Teijin PE (0,311 J). W przypadku układu dwuwarstwowego zauważalny jest znaczny (od 4 do 12 krotny) wzrost wartości energii odkształcenia.

5.3. Badanie cech balistycznych materiałów/półfabrykatów (ostrzał małowalibrowy)

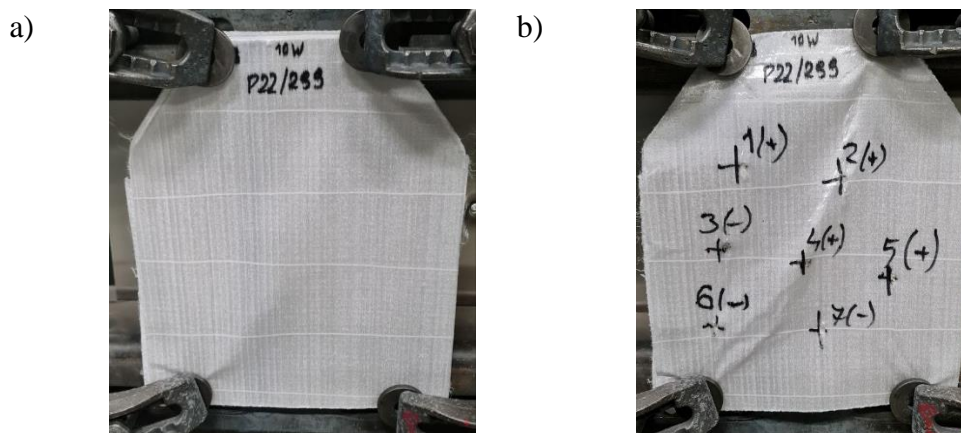
Dla wybranych próbek materiałów włóknistych, oprócz oceny właściwości fizyko-mechanicznych, dokonano także oceny ich balistycznych właściwości ochronnych. W celu wyznaczenia parametru, który w sposób bezpośredni odnosi się do cech balistycznych, tj. parametr V_{50} , przygotowano i zrealizowano badania strzelaniem zgodnie normą STANAG 2920. Testy balistyczne wykonano za pomocą układu badawczego (rys. 5.5), w skład którego wchodził specjalny statyw do mocowania próbek materiałowych, system pomiarowy prędkości pocisku bazujący na układzie podwójnej bramki świetlnej (typ LS06 firmy Prototypa-ZM), oraz układ miotający wyposażony w lufę balistyczną FSP kalibru 0.22 cala o oznaczeniu produkcyjnym 6248 długości 700 mm i skoku śrubowym 12".

Badania realizowane były dla 2 zestawów próbek na każdy typ materiału. Rozbieżność pomiędzy wynikami nie przekraczała założonych 2%, jednakże do analizy wyników przyjęto wynik o niższej wartości parametru V_{50} . Dla przykładu, różnica w otrzymanych wartościach prędkości V_{50} dla tożsamyh układów materiału DSM PE2, o oznaczeniu P22/297 ($V_{50}=470,2$ m/s) oraz P22/298 ($V_{50}=475,4$ m/s), wyniosła 5,2 m/s, co stanowi 1,1% różnicy.

Przykładowy wyciąg z raportu badań balistycznych dla próbki materiałowej P22/299 (widok na rys. 5.6.) stanowi tabela 5.2, natomiast obliczone wartości parametru V_{50} na podstawie danych otrzymanych z wykorzystaniem ww. stanowiska zestawiono w tabeli 5.3.



Rys. 5.5. Stanowisko badawcze do ostrzału odłamkiem standardowym FSP



Rys. 5.6. Przykład próbki materiałowej o ozn. P22/299 poddanej badaniu balistycznemu:
 a) próbka przed ostrzałem, b) próbka po ostrzale

Tabela 5.2. Wyznaczenie prędkości V50 przedstawione na przykładzie próbki P22/299

P22/299			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	470,4	470,3	+
2	488,2	488,2	+
3	511,0	511,0	-
4	479,9	479,8	+
5	507,6	507,6	+
6	507,4	507,3	-
7	508,6	508,4	-
Śred	500,4	500,4	
Maks	511,0	511,0	
Min	479,9	479,8	
Delta	31,1	31,2	
SDev	13,0	13,0	

Tabela 5.2. przedstawia wyniki ostrzału, gdzie odnotowano strzały z całkowitą penetracją próbki (-) oraz z częściową penetracją próbki (+) tj. z zatrzymaniem pocisku w próbce oraz bez śladu na cienkiej płycie świadek. Dla poszczególnych strzałów zarejestrowano wartości prędkości ostrzału próbki P22/299 oraz wyznaczony parametr V_{50} i parametry określające rozrzut uzyskanych prędkości (Delta (ΔV) - rozstęp; SDev – odchylenie standardowe). Zgodnie z metodyką przedstawioną w podrozdziale 4.3.2, na podstawie wartości prędkości trzech strzałów z penetracją próbki i trzech strzałów bez penetracji, dokonano wyliczenia parametru V_{50} . Uzyskane wyniki dla danej próbki to: V_{50} równe wartości 500,4 m/s przy parametrze ΔV równym 35,2. Pomiar prędkości odbywa się w układzie podwójnym zgodnie z wymaganiami normy STANAG 2920 opisanej w podrozdziale 4.3.2, w związku z czym uzyskano po dwa wyniki pomiarów prędkości dla każdego strzału. Z uzyskanych

parametrów V_{50} obu próbek, przyjęto wynik o niższej wartości. Postępując w tożsamy sposób z pozostałymi próbkami wyznaczono parametry V_{50} oraz ΔV .

Tabela 5.3. Zestawienie wyników parametru V_{50} dla poszczególnych próbek

Nazwa próbki	Numer próbki	Parametr V_{50} [m/s]	ΔV
Teijin PE	P22/301	481,3	19,7
Teijin UD	P22/303	< 429*	-
Honeywell PE	P22/299	500,4	31,2
DSM PE 1	P22/300	487,9	38,8
DSM PE 2	P22/297	470,2	35,1
DSM PE 3	P22/304	528,0	31,3

* ze względu na ograniczoną ilość materiału nie zdołano wyznaczyć parametru V_{50} , jednakże jego wartość jest mniejsza niż 429 m/s, co wynika z braku uzyskania min 3 strzałów bez penetracji dla prędkości 429 m/s i wyższych.

Otrzymane wyniki badań balistycznych ostrzałem przedstawione w tabeli 5.3 zostały określone dla próbek, których układy warstw skompletowano w taki sposób, aby masy wytypowanych próbek były możliwie jak najbardziej zbliżone do siebie (podrozdział 4.2.2, tabela 4.4). Zestawienie takie miało na celu porównanie cech odporności balistycznej poprzez parametr V_{50} dla każdego typu materiału włóknistego.

Najwyższą wartość prędkości granicznej uzyskano dla próbki DSM PE 3 (o masie 179 g), natomiast najniższą wartość dla próbki DSM PE2 (o masie 181 g). Na podstawie otrzymanych wyników parametru V_{50} , można stwierdzić, że dla próbek z materiału UHMWPE (o oznaczeniu PE) mieszczą się one w zakresie od 470,2 m/s do 528,0 m/s, natomiast parametr ΔV w żadnym przypadku nie przekroczył 40 m/s. Stosunkowo niska wartość parametru ΔV świadczy o podobieństwie wymiarowo-materiałowym układów i prawidłowym przygotowaniu układów materiałowych do prób.

Nie uzyskano jednoznacznego wyniku dla próbki Teijin UD. Pomimo wielokrotnego ostrzału (8 strzałów z penetracją układu) badanie przerwano przy penetracji układu dla wartości prędkości 429,3 m/s. Wynik ten oznacza, że wartość parametru V_{50} znajduje się poniżej 429 m/s i w związku ze znaczą rozbieżnością pomiędzy wynikami próbek z grupy materiałów UHMWPE oraz brakiem znacznej ilości materiału, na tym etapie badanie zakończono.

5.4. Ocena wyników badań tkanin i uzasadnienie wyboru materiałów dla uproszczonego rozwiązania konstrukcyjnego wkładu balistycznego

W celu poszukiwania relacji pomiędzy właściwościami fizyko-mechanicznymi materiału bazowego oraz jakością procesu technologicznego, a właściwościami balistycznymi kompozytu balistycznego w konstrukcji wkładu balistycznego, dokonano porównania dotychczas otrzymanych wyników badań doświadczanych (tabela 5.4).

Tabela 5.4. Zestawienie wyników obciążeń quasi statycznych z wynikami parametru balistycznego V_{50} dla próbek materiałów włóknistych

Nazwa Próbkki	Układ	Masa próbki [g]	Gęstość powierzchniowa materiału [$\text{kg}\cdot 10^{-3}/\text{m}^2$]	Maksymalna siła obciążająca [N]	Energia odkształcenia [mJ]	Parametr V_{50} [m/s] wyznaczony dla pakietów warstw
Teijin PE	<i>I</i> warstwa	10,3	146	167	311	481,3
Teijin UD	<i>I</i> warstwa	17,0	246	910	8 798	< 429*
Honeywell PE	<i>I</i> warstwa	17,5	257	2482	16 104	500,4
DSM PE 1	<i>I</i> warstwa	16,2	233	1162	11 650	487,9
DSM PE 2	<i>I</i> warstwa	18,1	264	2537	24 130	470,2
DSM PE 3	<i>I</i> warstwa	9,4	136	796	7 552	528,0

Analizując powyższe wyniki należy stwierdzić, że parametry wytrzymałościowe tkanin balistycznych w przeliczeniu na masę powierzchniową układu wydają się nie mieć powiązania ze zdolnościami absorpcji energii kinetycznej pocisku danej próbki wkładu balistycznego. Z przeprowadzonych wstępnych badań balistycznych na wytypowanych układach wkładów można wysunąć wniosek, że materiał aramidowy cechuje się znacznie niższą odpornością balistyczną przy zbliżonej masie układu w stosunku do układów z UHMWPE. Podczas gdy wyniki wytrzymałościowe badań quasi-statycznych wskazują, że najwyższą zdolność do przenoszenia obciążeń wykazuje właśnie materiał aramidowy Honeywell PE oraz DSM PE 2, który uzyskał najniższy wynik parametru V_{50} . Z kolei najwyższą wartość V_{50} odnotowano dla materiału DSM PE 3. Porównując zaś materiały UHMWPE względem siebie, nie można jednoznacznie przedstawić rozwiązania, które znacznie wykracza poza średnią wyników. W przypadku układu materiałowego DSM PE 3, ze względu na to, że parametr V_{50} osiągnął

najwyższą wartość, można domniemywać, że posiada potencjał do optymalizacji masowej w dalszym projektowaniu konstrukcji. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że wpływ na ostateczne właściwości balistyczne panelu ochronnego ma nie tylko sam materiał źródłowy, ale również parametry technologiczne wykorzystane do wytworzenia z niego panelu ochronnego.

Charakterystyki mechaniczne wynikające z testów w warunkach quasi-statycznego obciążenia z zastosowaniem penetratora o promieniu zaokrąglenia R10 układów warstw są znacząco różne dla poszczególnych materiałów. Porównując wyniki badań balistycznych z wartościami energii odkształcenia określonymi w warunkach obciążenia quasi-statycznego można zauważyć, że układy UHMWPE o małej wartości energii, cechują się stosunkowo wysoką wartością parametru V_{50} , natomiast dla tych o wysokiej energii wzrost wartości V_{50} nie jest proporcjonalny. Dlatego, należy stwierdzić, że **hipoteza o korelacji pomiędzy cechami balistycznymi a wytrzymałościowymi określonymi w warunkach quasi-statycznego obciążenia tkaniny balistycznej penetratorem, a tym samym o możliwości oceny wpływu właściwości wytrzymałościowych materiału bazowego (tkaniny) na właściwości balistyczne kompozytu balistycznego, nie została potwierdzona, a rezultaty nie dały oczekiwanej zgodności.**

W przypadku kontynuacji badań z tego zakresu naukowego należałoby jednak przeanalizować następujące zagadnienia:

- Wpływ właściwości wytrzymałościowych pojedynczego włókna użytego do tkaniny na właściwości balistyczne systemu w postaci parametru V_{50} rozwiązania balistycznego.
- Liczby warstw użytych do pakietowania próbek.
- Zbadania korelacji pomiędzy parametrami fizyko-mechanicznymi materiału bazowego a odpornością balistyczną (V_{50}) dla próbek materiałowych przed i po zastosowaniu technologii końcowej produkcji.
- Powiązanie parametrów wytrzymałościowych tkanin balistycznych z deformacją podłoża balistycznego (plasteliny) i dystrybucji energii w podłożu.

W związku z powyższymi wnioskami, dalsza ocena materiałów i konstrukcji wkładów balistycznych wytworzonych z wykorzystaniem założonych technologii produkcji była prowadzona na podstawie wyników badań balistycznych układów. Dlatego, bazując na dotychczasowych badaniach balistycznych, wszystkie materiały z grupy polietylenów UHMWPE zostały zakwalifikowane jako perspektywiczne do osiągnięcia założonych wymagań. Odrzucony został materiał aramidowy o oznaczeniu Teijin UD.

5.5. Badania balistyczne na uproszczonych modelach wkładów ochronnych

Badania balistyczne przeprowadzono na uproszczonych modelach wkładów z wykorzystaniem amunicji karabinowej kalibru 7,62 x 51 mm o oznaczeniu M80 (NATO BALL) [14, 15]. Pocisk ten spełnia wymagania obydwóch przyjętych norm badawczych. W tabelach 5.5 i 5.6 przedstawiono warunki badań, natomiast wyniki przeprowadzonych testów balistycznych zestawiono w tabelach 5.7 i 5.8. Kompletny raport ww. testów zawarto w załącznikach nr 2 (raport nr 002/04/2021) i nr 3 (raport nr 003/04/2021) do niniejszej rozprawy.

Na potrzeby badań wstępnych warunki ostrzałów zostały zmodyfikowane. W pierwszej kolejności przeprowadzono badanie zgodnie z normą NIJ 0101.06, z modyfikacją liczby strzałów, trzy zamiast sześciu, pozostawiając miejsce w centralnej części próbki, dla dodatkowego strzału wg normy PN-V87000. Modyfikacja miała na celu możliwość porównania metodyk poprzez weryfikację powtarzalności wyników w zakresie przebijalności próbki. Zmiany dotyczyły również zakresu pomiaru deformacji plasteliny balistycznej dla danego poziomu ochrony. Norma przewiduje pomiar po pierwszym i drugim strzale, natomiast w badaniu uwzględniono pomiar deformacji po każdym ze strzałów.

Następnie te same próbki poddano badaniu według normy PN-V-87000. Badanie przeprowadzono dla ostrzału pojedynczego z kontrolą deformacji plasteliny. Badanie to miało na celu zweryfikowanie, dla tego samego pocisku, różnic w zakresie przebijalności dla podłoża użytego do badania według normy NIJ 0101.06 w stosunku do podłoża użytego w badaniu PN-V-87000. Plastelina zgodna z normą PN-V-87000 charakteryzuje się mniejszą odkształcalnością, gdzie zakres wyników mieścił się w przedziale ugięć akceptowalnych wg normy tj. do 40 mm i wynosił w zależności od próbki, od 28,9 mm do 33,5 mm. Wyniki deformacji plasteliny wymaganej dla normy NIJ 0101.06 znajdują się w granicach od 39,5 mm do 64,0 mm. Jednakże uzyskano stosunkowo zbieżne wyniki w zakresie przebijalności z użyciem obu typów podłoża. Próbka DSM PE3 została przebita w obu przypadkach dla wszystkich strzałów.

Tabela 5.5. Warunki badań zgodnie ze standardem NIJ 0101.06.

Required Test method (Wymagana metoda badania)	NIJ Standard–0101.06 (Modified)
Tested level of protection (Badany poziom odporności)	III (Modified)
Deviations from the norm (Odstępstwa od normy)	Ostrzał tylko prostopadły do próbki Pomiar ugięć po 1, 2 i 3 strzale w próbkę Ilość próbek wg wymagań klienta
Wyposażenie badawcze i jego dane techniczne	
Calibre (Kaliber)	7,62x51 mm
Bullet type (Rodzaj pocisku)	FMJ
Bullet mass (Masa pocisku)	9,6 g
Bullet velocity (Prędkość pocisku)	847 m/s ± 9,1 m/s
Velocity measurement (Pomiar prędkości)	2,5 m przed próbką
Weapon (Lufa)	Test barrel SN. 6244
Barriell length (Długość lufy)	650 mm
Shooting distance (Dystans ostrzału)	15 m
Room temperature (Temp otoczenia)	19,4°C (09.04.2021), 19,6°C (14.04.2021)
Humidity (Wilgotność)	30% (09.04.2021), 31% (14.04.2021)
Conditioning (Kondycjonowanie)	wilgotność: 50% ± 20%; temperatura: 21°C ± 2.9°C
Sample condition (stan próbek)	Brak uwag
Penetration witness (Świadek)	Plastelina o ozn. ROMA No.1
Deflection limit after shots (Dopuszczalna deformacja po ostrzale)	44 mm
Hit pattern (preset) (Szablon ostrzału)	Zgodnie z wymaganiami klienta

Tabela 5.6. Warunki badań zgodnie ze standardem PN-V-87000

Required Test method (Wymagana metoda badania)	PN-V-87000:2011 (Modified)
Tested level of protection (Badany poziom odporności)	K3 C (Modified)
Deviations from the norm (Odstępstwa od normy)	Pojedynczy ostrzał prostopadły do próbki Pomiar ugięć dla 1 strzału Ilość próbek wg wymagań klienta
Wyposażenie badawcze i jego dane techniczne	
Calibre (Kaliber)	7,62x51 mm
Bullet type (Rodzaj pocisku)	FMJ
Bullet mass (Masa pocisku)	9,6 g
Bullet velocity (Prędkość pocisku)	840 m/s ± 15 m/s
Velocity measurement (Pomiar prędkości)	2,5 m przed próbką
Weapon (Lufa)	Test barriell SN. 6244
Barriell length (Długość lufy)	650 mm
Shooting distance (Dystans ostrzału)	15 m
Room temperature (Temp otoczenia)	19,1°C
Humidity (Wilgotność)	43%
Conditioning (Kondycjonowanie)	wilgotność: 50% ± 20%; temperatura: 21°C ± 2.9°C
Sample condition (stan próbek)	Próbki po ostrzale wg normy NIJ Standard– 0101.06 Lv III (Modified)
Penetration witness (Świadek)	Plastelina wg PN-V-87000
Deflection limit after shots (Dopuszczalna deformacja po ostrzale)	40 mm
Hit pattern (preset) (Szablon ostrzału)	Zgodnie z wymaganiami klienta

Tabela 5.7. Wyniki badań wg normy NIJ 0101.06 p. III (po modyfikacji) na uproszczonych modelach wkładów

Nr. próbki	Próbka	Kaliber i oznaczenie pocisku	Kąt ostrzału (°)	Numer strzału	Wyniki			
					Prędkość (m/s)		Rezultat (+/-)	Def. (mm)
P21/054	Honeywell PE	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	854.9	854.8	+	59,8
			0.0	2	857,8	857,9	+	49,8
			0.0	3	850,0	850,0	+	50,7
P21/055	DSM PE 2	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	860,8	860,8	-	
			0.0	2	864,5	864,5	+	44,1
			0.0	3	859,4	859,5	-	
P21/056	DSM PE 1	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	835,8	835,7	+	64,0
			0.0	2	857,0	857,0	+	53,1
			0.0	3	848,0	848,0	+	61,5
P21/057	DSM PE 3	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	877,9	877,9	-	
			0.0	2	857,8	857,7	-	
P21/058	Teijin PE	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	849,5	849,5	+	39,5
			0.0	2	850,9	850,8	+	56,8
			0.0	3	846,5	846,6	+	48,9

Tabela 5.8. Wyniki badań wg normy PN-V-87000:2011 (po modyfikacji) na uproszczonych modelach wkładów. Wynik w postaci liczbowej oznacza wartość deformacji podłoża balistycznego w mm

Kąt ostrzału: 90° = 0° NATO

P21/054			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	850,1	850,1	28,9

P21/055			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	829,4	829,4	31,2

P21/056			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	847,2	847,2	33,5

P21/057			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	838,5	838,5	-

P21/058			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	857,6	857,5	29,3

Dla próbek poddanych badaniom ostrzałem wg normy NIJ 0101.06 stwierdza się, że nie spełniają wymagań normy w zakresie odporności balistycznej dla poziomu III. W przypadku próbek P21/054, P21/056 i P21/058, brak spełnienia wymagań wynika z przekroczenia dopuszczalnej deformacji podłoża powyżej wartości 44 mm. Natomiast w przypadku próbek P21/055 oraz P21/057 nastąpiło ich przebicie.

Wyniki badań bazujących na normie PN-V-87000 wskazują na spełnienie wymagań w zakresie deformacji podłoża poniżej wymaganej wartości 40 mm dla próbek P21/054, P21/055, P21/056 oraz P21/058. Próbką P21/057 została przebita pociskiem, pomimo znacznie niższej wartości prędkości pocisku tj. 838,5 m/s, co znajduje potwierdzenie również w badaniu balistycznym metodą NIJ.

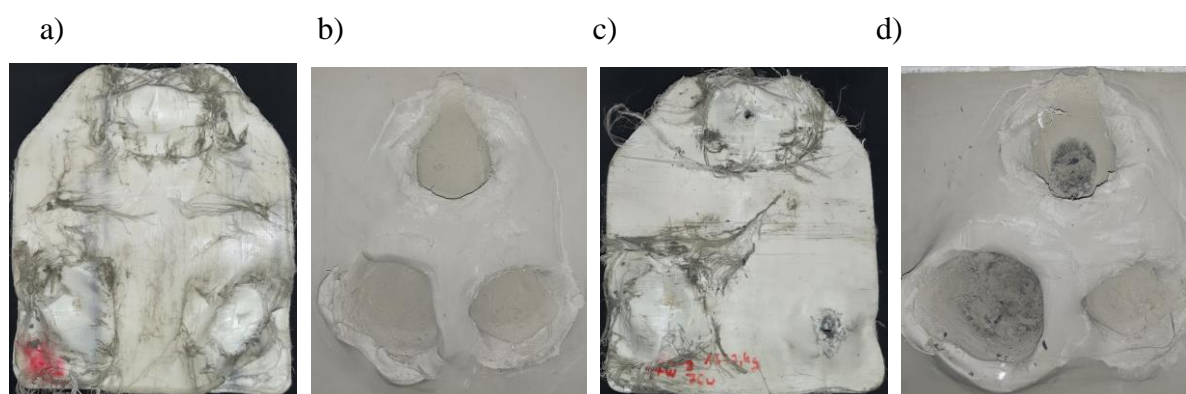
5.6. Analiza wyników badań balistycznych na uproszczonych modelach wkładów ochronnych

Stosując metodę badania ostrzałem na podstawie normy NIJ 0101.06 stwierdzono, że żadna próbka nie spełniła wymagań normy. Minimalny poziom akceptacji to brak penetracji dla wszystkich strzałów oraz stwierdzenie deformacji podłoża na poziomie nie większym niż 44 mm. Biorąc pod uwagę wyniki pierwszego strzału, czyli bez wpływu poprzednich strzałów można uznać, że najlepszy wynik uzyskała próbka o nr. P21/058 o oznaczeniu Teijin PE. W przypadku danej próbki nie stwierdzono penetracji pociskiem, natomiast zmierzona wartość deformacji po pierwszym strzale wyniosła 39,5 mm. Przykładowe zdjęcia próbek i podłoża przedstawiono na rys 5.7.

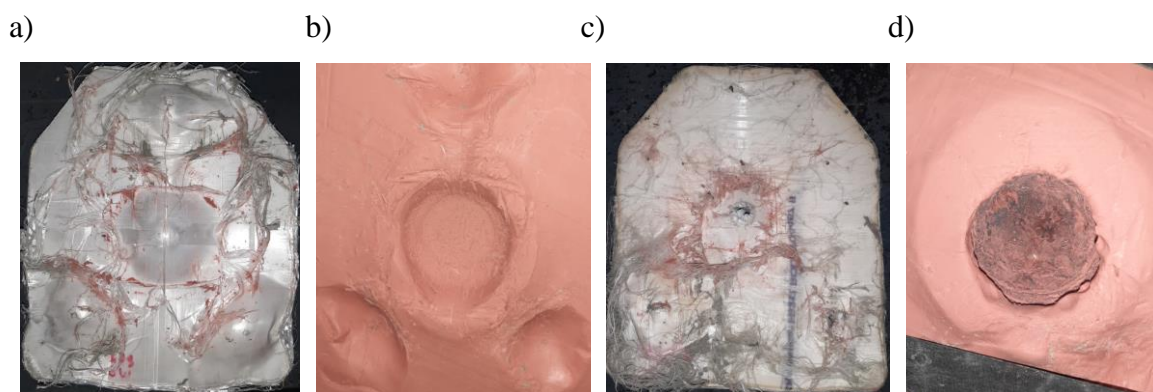
Porównywalne wyniki, również bez penetracji, odnotowano dla próbek P21/056 o oznaczeniu DSM PE 1 oraz P21/054 o oznaczeniu Honeywell PE, gdzie zmierzone wartości deformacji wynoszą odpowiednio 64,0 mm oraz 59,8 mm.

Próbki, dla których odnotowano penetrację układu, to wkłady P21/057 o oznaczeniu DSM PE 3 oraz P21/055 o oznaczeniu DSM PE 2. Penetracja mogła wynikać z przekroczenia dopuszczalnej według normy prędkości ostrzału, co wzięto pod uwagę przy dalszych badaniach oraz optymalizacji układu.

W ramach badań wg normy PN-V-87000 uzyskano również potwierdzenie, że próbka P22/057 o oznaczeniu DSM PE 3 uległa całkowitej penetracji, pomimo niższej od wcześniejszej próby, prędkości strzału (mieszczącego się w zakresie normy).



Rys. 5.7. Przykład próbek po badani u wg NIJ 0101.06. a) tylna strona próbki P21/054 bez penetracji; b) plastelinowe podłoże próbki P21/054 bez penetracji; c) tylna strona próbki P21/055 z penetracją; d) plastelinowe podłoże próbki P21/055 z penetracją strzałów nr. 1 i 3



Rys. 5.8. Przykład próbek po badani u wg PN-V-87000 a) tylna strona próbki P21/058 bez penetracji; b) plastelinowe podłoże próbki P21/058 bez penetracji; c) tylna strona próbki P21/057 z całkowitą penetracją; d) plastelinowe podłoże próbki P21/057 z całkowitą penetracją

Celem badań balistycznych na uproszczonych modelach było także potwierdzenia wstępnych założeń konstrukcyjno-technologicznych sformułowanych dla przyjętych układów materiałowych. Wyniki wskazują na znaczne różnice pomiędzy zastosowanymi materiałami bazowymi użytymi do wykonania próbek. Pomimo zastosowania zbliżonych wagowo modeli wkładów oraz bazując na takich samych parametrach technologicznych, ostateczne rezultaty różnią się między sobą znacząco.

Pomimo elaboracji amunicji, poprzez naważanie zadanej masy prochu, prędkość w zależności od innych czynników (wilgotność powietrza, ciśnienie, niejednorodność prochu) jest wartością zmienną, co ma wpływ na wartość deformacji podłoża i ewentualną perforację próbki. W niektórych przypadkach pomimo przekroczenia prędkości normatywnej nie odnotowano przebicia próbki (Honeywell PE oraz DSM PE 2). Natomiast, dla próbki o nr P21/057 zauważyć można, że przebicie może nastąpić niezależnie od poziomu prędkości, i jest najprawdopodobniej wynikiem zastosowania niedostatecznie dużej liczby warstw dla danego układu. Biorąc pod uwagę powyższe, można stwierdzić, że kwestia odporności balistycznej oraz deformacji podłoża balistycznego stanowią dwie odrębne kwestie.

Odpowiednią odporność balistyczną można osiągnąć poprzez korelację doboru odpowiedniej liczby warstw tkanin materiałowych z założonymi parametrami technologicznymi. Jest to warunek podstawowy, po spełnieniu którego, konstrukcję można modyfikować tak aby osiągnąć pożądaną energochłonność konstrukcji przekładającą się na odpowiednią deformację podłoża (tzw. efekt traumy). Wielkość traumy wkładu możemy redukować, poprzez zwiększenie warstw materiału bazowego, wprowadzenie dodatkowego materiału pochłaniającego energię (pianki wysokiej gęstości), modyfikację kształtu lub zastosowanie specjalnej powłoki usztywniającej.

Do dalszych prac rozwojowych badanych konstrukcji, zakwalifikowano wszystkie z dotychczasowych rozwiązań, które po modyfikacji konstrukcyjnej i technologicznej zostały wykorzystane w produkcji prototypów wkładów.

5.7. Modyfikacja konstrukcji i wykonanie prototypów wkładów balistycznych

Na podstawie oceny wyników z badań uproszczonych modeli dokonano optymalizacji układów celem wytworzenia prototypów wkładów ochronnych. Na tym etapie rozwoju konstrukcji, podstawowym założeniem było spełnienie warunku założonego poziomu ochrony balistycznej dla wybranych układów materiałowych. W tym celu dokonano modyfikacji liczby warstw dla poszczególnych rozwiązań wkładów. Wykonano również korekty w procesie technologicznym w zakresie ciśnienia i wykończenia powierzchni wkładów.

Panele zostały wykończone materiałem tekstylnym na bazie poliamidu o masie około 50-60 g na próbkę. Zestawienie charakterystyk wymiarowych i masowych próbek przed i po prasowaniu przedstawiono w tabelach 5.9 i 5.10, z kolei widok wykonanych wkładów przedstawiono na rys. 5.9. Weryfikacja partii prototypowej, po odjęciu wykończeniowego materiału tekstylnego (ok. 50-60 g), ujawniła ubytek masy po prasowaniu na poziomie do 3%, który został zidentyfikowany już podczas wykonania modeli wstępnych.

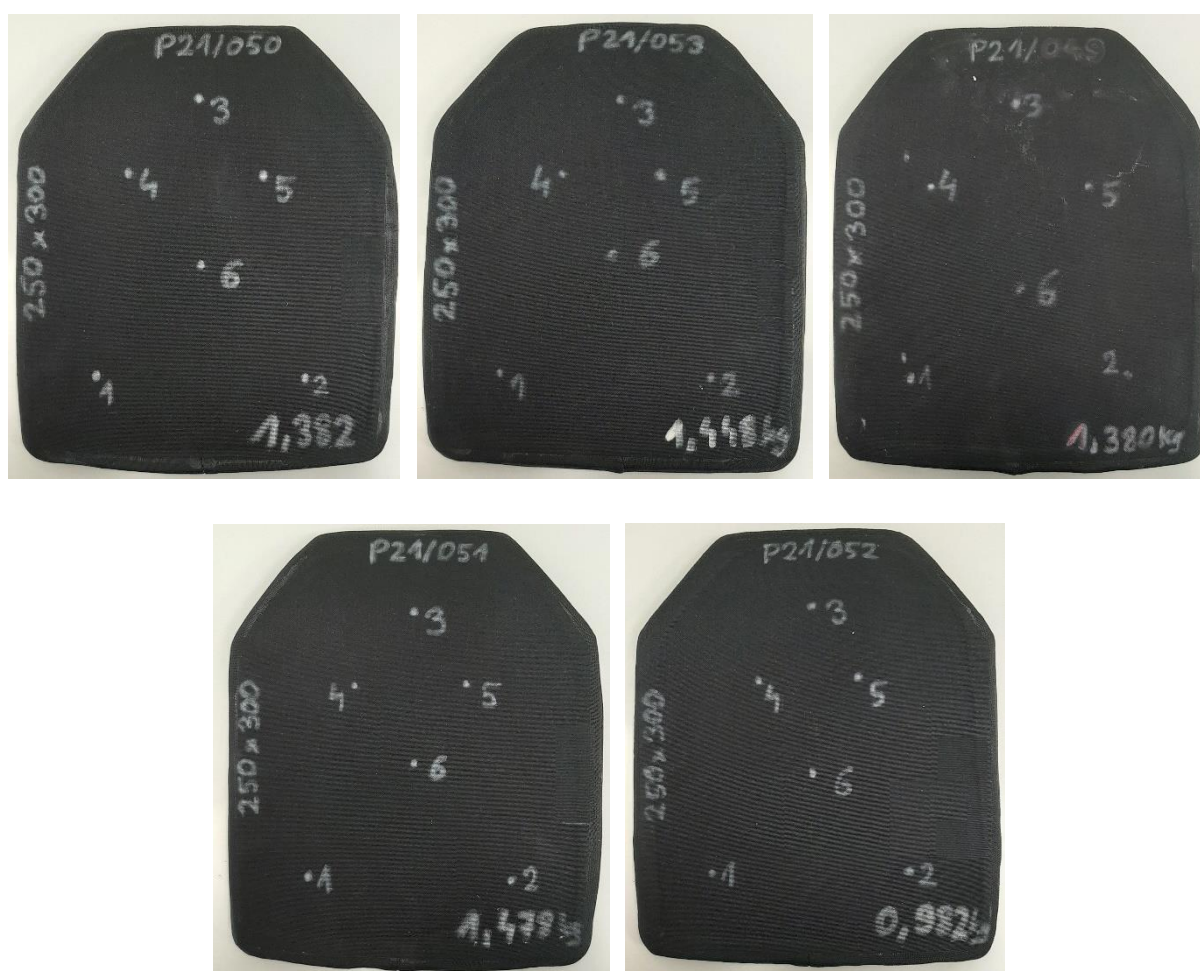
Wkłady ochronne w postaci prototypowych modeli, stanowią już kompletną konstrukcję, zbliżoną do produkcyjnych rozwiązań. Zastosowano najłżejszy możliwy układ wykończenia, tj. materiał tekstylny. Podjęto decyzję o niestosowaniu dodatkowej warstwy absorbera energii ugięcia, ze względu na potrzebę odniesienia wyników badań balistycznych do uproszczonych modeli wkładów. Głównym oczekiwaniem poddanych badaniom balistycznym konstrukcji prototypowych wkładów po modyfikacjach jest osiągnięcie braku penetracji układu. Kolejnym czynnikiem podlegającym ocenie jest weryfikacja wielkości deformacji podłoża.

Tabela 5.9. Zestawienie danych wymiarowych i masowych układów materiałowych w pakietach do prasowania

Materiał podstawowy (numer próbki)	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość PE [mm]	Masa [g]
Teijin PE	300	250	32,5-36,5	1332,0
Honeywell PE	299	250	31,0-31,5	1437,0
DSM PE 1	300	250	25,4-27,2	1364,5
DSM PE 2	299	250	30,7-33,1	1458,0
DSM PE 3	300	249	18,0-19,1	971,0

Tabela 5.10. Zestawienie danych wymiarowych i masowych układów materiałowych po prasowaniu i wykończeniu

Material podstawowy (numer próbki)	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Masa [g]
Teijin PE (P21/050)	300	250	24,7 – 25,9	1382
Honeywell PE (P21/053)	300	250	25,3 – 25,9	1448
DSM PE 1 (P21/049)	300	251	25,5-26,1	1380
DSM PE 2 (P21/051)	301	250	25,8-26,2	1478
DSM PE 3 (P21/052)	299	250	19,9-21,1	982



Rys. 5.9. Widok powierzchni modeli prototypowych wkładów balistycznych

5.8. Badania balistyczne konstrukcji prototypowych

Przeprowadzone badania balistyczne wykonano zgodnie z wcześniej przedstawioną metodyką, jednakże ograniczono się tylko do ostrzału zgodnie z normą NIJ 0101.06, ze względu na bezpośrednie odniesienie i porównanie wyników do poprzednich rezultatów. Badanie balistyczne konstrukcji prototypowych przeprowadzono na podstawie normy NIJ bazując na tych samych założeniach jak dla badań uproszczonych modeli. W celu dalszego rozwoju konstrukcji, niezbędne było pozyskanie informacji wynikających z porównania efektów odporności balistycznej i ugięć modeli wstępnych wkładów w stosunku do wkładów prototypowych. Wyniki badań ostrzałem przedstawiono w tabeli 5.11. Kompletny raport zawiera załącznik nr 4 do dysertacji (raport nr 002/05/2021).

Tabela 5.11. Wyniki badań wg normy NIJ 0101.06 p. III (po modyfikacji) wkładów prototypowych

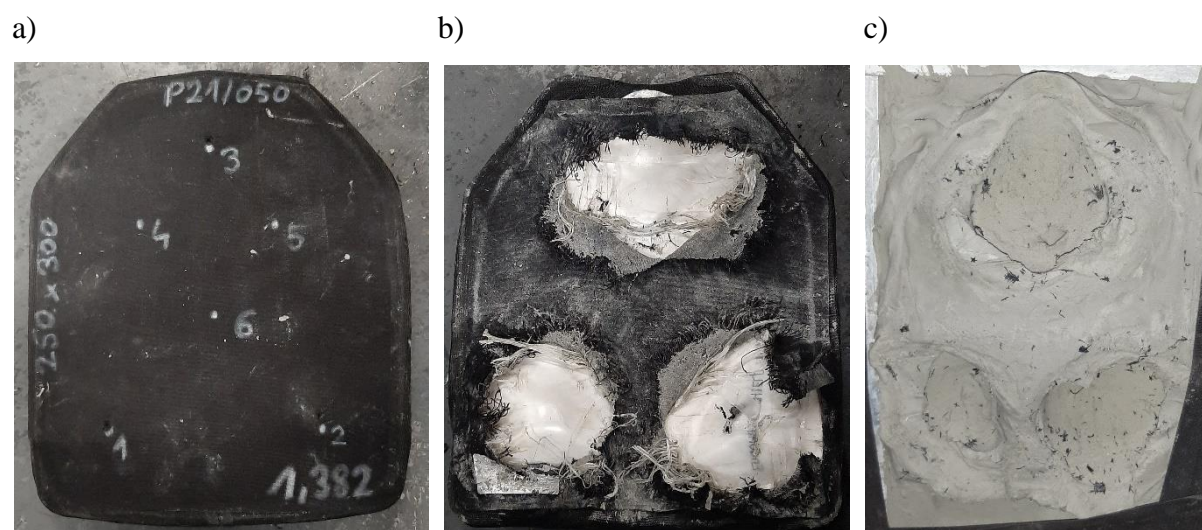
Nr. próbki	Próbka	Kaliber i oznaczenie pocisku	Kąt ostrzału (°)	Numer strzału	Wyniki			
					Prędkość (m/s)		Rezultat (+/-)	Def. (mm)
P21/049	DSM PE 1	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	845.5	845.5	+	50.8
			0.0	2	845.2	845.2	+	48.5
			0.0	3	847.3	847.4	+	46.5
P21/050	Teijin PE	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	849.3	849.1	+	36.0
			0.0	2	850.7	850.7	+	43.3
			0.0	3	850.6	850.6	+	43.0
P21/051	DSM PE 2	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	857.7	857.7	+	34,3
			0.0	2	838.8	838.7	+	38,0
			0.0	3	847.2	847.2	+	46,1
P21/052	DSM PE 3	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	849,0	849,0	+	61,3
			0.0	2	855,1	855,1	+	64,2
			0.0	3	855,6	855,7	+	58,8
P21/053	Honeywell PE	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	0.0	1	858,5	858,5	+	67,2
			0.0	2	848,0	848,0	+	54,5
			0.0	3	840,7	840,7	+	54,2

Nie stwierdzono przebicia żadnej próbki wkładów prototypowych. Najmniejsza średnia wartość deformacji podłoża 39,5 mm z trzech strzałów otrzymano dla próbki o oznaczeniu

DSM PE 2 (przy deformacji równej 34,3 mm dla pierwszego strzału) oraz Teijin PE o wartości 40,7 mm (przy deformacji równej 36,0 mm dla pierwszego strzału). Największą średnią deformację 61,4 mm odnotowano dla próbki DSM PE 3, natomiast próbka o największej jednostkowej wartości deformacji podłoża to próbka Honeywell PE z wynikiem 67,2 mm. Jediną próbką, która spełniła kryterium maksymalnej dopuszczalnej deformacji dla każdego strzału tj. poniżej 44 mm to próbka Teijin PE.

5.9. Analiza wyników badań balistycznych konstrukcji prototypowych

Podsumowując uzyskane rezultaty badań ostrzałem można wysnuć wniosek, że osiągnięto spełnienie założeń optymalizacyjnych, tj., wszystkie próbki wkładów prototypowych zapewniły ochronę balistyczną poprzez brak perforacji układów materiałowych. Stwierdzono również, że próbka P21/050 o oznaczeniu Teijin PE spełniła wymagania normy NIJ 0101.06 (rys. 5.10).



Rys. 5.10. Zdjęcie próbki P21/050 po ostrzale. a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) podłoże balistyczne

Układy materiałowe o oznaczeniu DSM PE2 oraz DSM PE3 po dokonanych modyfikacjach uzyskały pozytywny rezultat w postaci braku penetracji. Wartości deformacji podłoża dla próbki P21/052 reprezentującej materiał DSM PE3 wykazały stosunkowo duże przekroczenia, natomiast wyniki deformacji próbki P21/051 (DSM PE2) dla strzałów numer 1 i 2 mieściły się w kryteriach normy, strzał numer 3 przekroczył kryterium o 2,1 mm.

Porównywalną poprawę parametrów ochronnych odnotowano dla próbki P21/049, dla której wartość deformacji podłoża balistycznego, po dokonaniu optymalizacji układu, uległa

zmniejszeniu od 9% do 24%. Niestety, pomimo poprawy rezultatów, w dalszym ciągu deformacje podłoża plastelinowego były dalekie od spełnienia kryterium normy.

Kolejnym analizowanym układem był materiał o oznaczeniu Honeywell PE (próbka nr P21/053), dla którego pomimo braku perforacji, odnotowano znaczne przekroczenie dopuszczalnej deformacji. Interesujący jest fakt, że w tym przypadku, pomimo stosunkowo znacznego zwiększenia masy układu, deformacja podłoża uległa zwiększeniu o blisko 11% względem poprzedniej konfiguracji wkładu. Racjonalnym uzasadnieniem wydaje się być tutaj kwestia technologii prasowania, gdyż polietylen z grupy tego producenta jest wyraźnie podatny na zastosowane parametry ciśnienia i temperatury. Stąd, zastosowana technologia dla tego układu, pomimo większej liczby warstw nie przyniosła oczekiwanych rezultatów.

Na podstawie uzyskanych wyników następnym krokiem jest wytypowanie najbardziej rokujących rozwiązań oraz przeprowadzenie końcowej ich optymalizacji.

5.10. Eliminacja konstrukcji o niskim współczynniku rokowania i założenia konstrukcyjne po modyfikacji dla prototypów przedprodukcyjnych

Na obecnym etapie rozwoju konstrukcji wkładu dokonano wyboru rozwiązań, które spełniają lub z dużym prawdopodobieństwem mogą spełnić postawione kryteria. Istotna z punktu założeń jest również ocena wykorzystania obecnie stosowanych technologii produkcyjnych firmy. Podsumowując uzyskane wyniki z badań ostrzałem, poniżej przedstawiono ocenę i kwalifikację poszczególnych systemów do wykonania ostatecznych prototypów przedprodukcyjnych.

Analizując wyniki dotychczas przeprowadzonych prac badawczo-rozwojowych, można stwierdzić, że najbardziej rokującym rozwiązaniem jest system o oznaczeniu Teijin PE. Wytworzona próbka prototypowa, już po pierwszej modyfikacji układu warstw spełniła założenia konstrukcyjne oraz główne kryteria ochrony balistycznej wg normy NIJ 0101.06. Konstrukcja ta jest kompatybilna z zastosowaną technologią produkcji, co oznacza, że jest przewidywalna w zakresie oczekiwanego zmniejszenia deformacji przy zwiększeniu liczby warstw układu. Rozwiązanie to jako najlżejsze (1382 g), spełniające wymagania normy, zostało zakwalifikowane do produkcji w układach prototypowych.

W trakcie weryfikacji systemu o oznaczeniu Honeywell PE, stwierdzono, że pomimo zwiększonej ilości warstw materiału, a tym samym wyższej masy wkładu, nie osiągnięto redukcji wartości deformacji podłoża. Powyższe może wskazywać na brak kompatybilności materiału z przyjętą technologią i założonymi parametrami technologicznymi, co w

następstwie kontynuacji produkcji, może mieć negatywny wpływ na powtarzalność produkcji. Zakładając przyjęty wcześniej dodatkowy zapas technologiczny na powłokę ochronną wkładu o masie około 300 g, kryterium masy wkładu balistycznego (ok 1,6 kg) nie zostanie spełnione. W związku z czym nie jest uzasadnione prowadzenie dalszych prac rozwojowych nad tym wyrobem.

Następnymi ocenianymi układami są systemy o oznaczeniu DSM PE 1 oraz DSM PE 2, które również nie zostały zakwalifikowane do dalszych prac. Jako uzasadnienie przyjęto, że obydwa układy wymagałyby dalszych zmian zmierzających w kierunku zwiększenia liczby warstw, a tym samym wzrostu masy. System DSM PE 1, pomimo niskiej masy próbki 1380 g, wymagałoby dodania kolejnych warstw, a tym samym zwiększenia ciężaru w związku ze stosunkowo dużymi przekroczeniami wartości deformacji podłoża. Natomiast rozwiązanie DSM PE 2 jest już poza limitem masy założonego kryterium, pomimo osiągnięcia parametrów balistycznych względnie bliskich wymaganiom normy wartościom deformacji podłoża. Dodatkowo dla tego układu zauważono niebezpieczną tendencję do wzrostu wartości deformacji podłoża dla kolejnych strzałów, podczas gdy w przypadku pozostałych próbek wartość deformacji podłoża dla strzałów w kolejności 2 i 3 stabilizowała się na zbliżonym poziomie lub wręcz ulegała zmniejszeniu.

Pozostały układ o oznaczeniu DSM PE 3 pomimo tego, że nie spełnił założeń normy w zakresie wymaganej wartości deformacji podłoża, został zakwalifikowany do dalszych prac rozwojowych i wykonania prototypu. Uzasadnieniem przemawiającym za dalszym procedowaniem nad tym systemem jest fakt, że od początku układ materiałowy cechował znaczny zapas masy projektowej w stosunku do uzyskanych wysokich wartości parametru $V_{50} = 528$ m/s (dla próbki reprezentatywnej o masie 179 g). Masa próbki poddana badaniu balistycznemu jest w dalszym ciągu o 29% mniejsza od rozwiązania Teijin PE, co daje pole do dalszej modyfikacji poprzez wzmocnienie układu w kolejnym etapie opracowania przedprodukcyjnego i prototypu wkładu balistycznego.

Podsumowując, rozwiązania, które zostały zakwalifikowane do dalszych prac to systemy o oznaczeniach Teijin PE oraz DSM PE 3. Przyjęto także, że technologia w zakresie prasowania wysokociśnieniowego nie będzie poddawana dalszym modyfikacjom. Prototypowy panel przedprodukcyjny z układu materiałowego Teijin PE zostanie wytworzony w tej samej konfiguracji jak poprzednia konstrukcja prototypowa. Natomiast prototyp panelu bazującego na rozwiązaniu DSM PE 3 zostanie poddany modyfikacjom w celu zmniejszenia oddziaływania na podłoże balistyczne. W tym celu zostanie zwiększona liczba warstw materiału o ok 15%.

Obydwa prototypy zostaną pokryte docelową powłoką ochronną wkładu w postaci struktury polimocznikowej o grubości warstwy ok 2 mm z dodatkowym panelem ze spienionego polipropylenu grubości około 6 mm. Szacowana dodatkowa masa to około 300 g na panel. Zastosowanie powyższego rozwiązania ma na celu, ujednolicenie i ograniczenie traumy odkształceń podłoża, średnio o około 20%.

W celu zbadania prototypów w sposób umożliwiający wyciągnięcie jak największej liczby wniosków po wprowadzonych modyfikacjach, panele zostaną przebadane na zgodność z polską normą tj. PN-V-87000 poziomu K3C (7,62 x 51 mm FMJ NATO BALL o desygnacji M80), gdzie pomiar deformacji podłoża mierzony jest po każdym z sześciu wymaganych strzałów oraz dopuszczalna jej wartość nie może przekroczyć 40 mm.

5.11. Modyfikacje konstrukcji i wykonanie prototypów przedprodukcyjnych do badań weryfikacyjnych

Proces produkcji partii przedprodukcyjnych w zakresie technologii wycinania oraz prasowania nie uległ modyfikacji względem poprzednio opisanej partii (dla wkładów prototypowych). Rozwiązanie Teijin PE zostało przygotowane w takim samym układzie warstw, przy czym wystąpiła stosunkowo niewielka różnica w masie (31 g) wyciętego układu względem wcześniejszych układów prototypowych, która wynika z dokładności cięcia pakietów materiałowych. Różnica ta jest, jednakże mała i mieści się w tolerancji masy deklarowanej przez producenta. Natomiast liczba warstw pakietów materiałowych wytworzonych na bazie systemu DSM PE 3 została zwiększona zgodnie z przyjętymi założeniami o 15% (153 g) (tab.5.12).

Tabela 5.12. Zestawienie pomiarów geometrycznych i masowych układów materiałowych w pakietach do prasowania

Materiał podstawowy (numer próbki)	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość PE [mm]	Masa [g]
Teijin PE	300	250	32,5-36,5	1301
DSM PE 3	300	249	18,0-19,1	1124

W następnej operacji technologicznej, pakiety materiału balistycznego zostały poddane procesowi prasowania wysokociśnieniowego, podczas którego jak już wcześniej obserwowano ubytek masy na poziomie 3-4% będący rezultatem odparowania wilgoci i części lepiska (tabela 5.13).

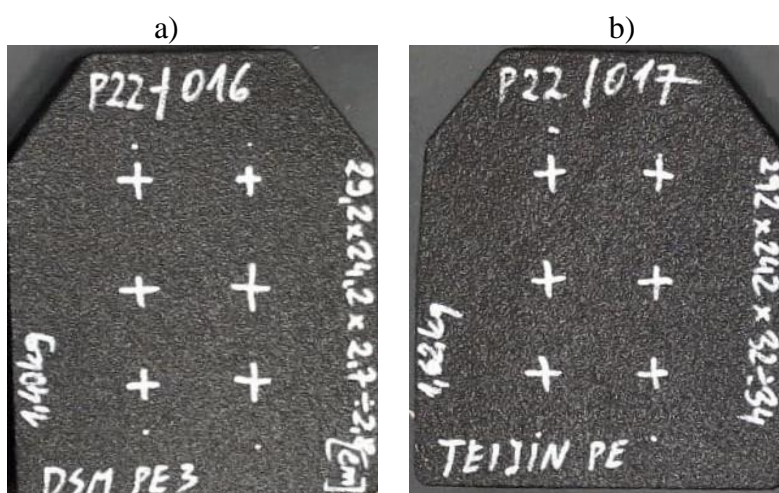
Ostatnią fazą produkcyjną prototypów przedprodukcyjnych było przyklejenie wyciętego laserowo arkusza ze spienionego polipropylenu o grubości ok. 6 mm, a następnie pokrycie go kompozytem polimerowo polimocznikowym o grubości warstwy ok. 2 mm (tabela 5.14). Pomimo tego, że uzyskano wyniki bez perforacji wkładów prototypowych, wartości deformacji podłoża były graniczne lub przekroczone. Wartość deformacji dla systemu Teijin PE (43,3 mm) była na granicy akceptowalnej tolerancji tj. < 44 mm, zaś dla próbki DSM PE 3 – znacznie powyżej tolerancji (64,2 mm). W związku z powyższym, wprowadzono warstwę spienionego polipropylenu od strony kontaktu z ciałem użytkownika jako dodatkowy absorber energii uderzenia.

Tabela 5.13. Zestawienie pomiarów geometrycznych i masowych wkładów w pakietach po prasowaniu

Material podstawowy (numer próbki)	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Masa [g]
Teijin PE (P22/017)	300	250	21,5-22,0	1268
DSM PE 3 (P22/016)	299	250	18,0-18,5	1076

Tabela 5.14. Zestawienie pomiarów geometrycznych i masowych gotowych prototypów wkładów balistycznych do badań weryfikacyjnych

Material podstawowy (numer próbki)	Długość [mm]	Szerokość [mm]	Grubość [mm]	Masa [g]
Teijin PE (P22/017)	300	250	32-34	1626
DSM PE 3 (P22/016)	299	250	27-28	1400



Rys. 5.11. Widok przedprodukcyjnych wkładów prototypowych z wykończeniem powłoką ochronną: a) 22/016 – układ DSM PE 3; b) 22/017 – układ Teijin PE

5.12. Badania weryfikacyjne zgodnie z założonym standardem

Badania certyfikujące są procesem złożonym, wymagającym przeprowadzenia czynności pobrania losowej liczby próbek z partii oraz badaniu w różnych warunkach. Wybór z partii został przeprowadzony na podstawie wykonania po 3 sztuk każdego rozwiązania i analizy jakościowej celem wyselekcjonowania układów najbardziej reprezentatywnych. Badania przeprowadzono w warunkach podstawowych jako badania weryfikacyjne a nie certyfikujące. Panele przedprodukcyjne zostały poddane badaniom weryfikującym na zgodność ze standardem PN-V-87000 dla poziomu odporności K3C. Zastosowanie tej normy pozwoli na ocenę układu w zakresie deformacji podłoża dla każdego z sześciu prostopadłe oddanych strzałów. Przed i po ostrzale serią, dla każdej próbki zweryfikowano stan podłoża na zgodność z ww. normą. Zarówno przed przystąpieniem do ostrzału jak i bezpośrednio po 6 strzale stwierdzono prawidłowe odkształcenia plasteliny badanej wzorcem zgodnie z procesem opisanym w rozdziale IV w tabeli 4.13. Pełny raport z badań zawierają załączniki nr 5 (raport nr 005/01/2022) i nr 6 (raport nr 006/01/2022).

Na podstawie przedstawionych w tabeli 5.15 wyników, dla paneli ochronnych rozwiązań konstrukcyjnych oznaczonych jako DSM PE3 oraz Teijin PE nie stwierdzono perforacji w żadnym z dokonanych ostrzałów. Zarejestrowane prędkości strzałów mieszczą się w dopuszczalnym przez normę zakresie ($840 \text{ m/s} \pm 15 \text{ m/s}$) co oznacza, że wszystkie strzały zostały zakwalifikowane jako prawidłowe w odniesieniu do wymagań normy.

W przypadku próbki P22/016 (o oznaczeniu materiału DSM PE 3), pomimo braku perforacji, dla strzałów nr. 1, 5 i 6 zarejestrowano deformacje o wartościach, odpowiednio 45,0 mm, 47,5 mm oraz 52,3 mm, które przekroczyły dopuszczalną wartość. W związku z powyższym materiał DSM PE 3, po modyfikacjach konstrukcyjnych i technologicznych, nie spełnił wymagań normy w zakresie odporności balistycznej poziomu K3C wg normy PN-V-87000. Dokonano, również oceny wizualnej odkształceń i zniszczeń panelu ochronnego. Zauważalne jest uszkodzenie powłoki polimocznikowej w miejscach podparcia (od strony plasteliny) w obrębie wszystkich strzałów, natomiast dla strzałów o nr 5 i 6 - znaczne odkształcenie materiału widoczne na zdjęciach przedstawionych na rysunku 5.12.

Tabela 5.15. Wyniki badań wg normy PN-V-87000 poziomu K3C dla prototypowych wkładów przedprodukcyjnych po modyfikacji rozwiązania konstrukcyjnego i technologicznego

Badanie wg PN-V-87000:2011 - poziom K3C								
Materiał	Nr próbki	Masa [g]	Nr strzału	Prędkość 1 [m/s]	Prędkość 2 [m/s]	Prawidłowy	Deformacja podłoża	Badanie plasteliny
DSM PE 3	P22/016	1400	1	836,1	836,0	TAK	45,0	+/+
			2	836,4	836,3	TAK	38,2	
			3	830,1	830,0	TAK	33,8	
			4	841,1	841,0	TAK	34,0	
			5	842,2	842,0	TAK	47,5	
			6	845,4	845,3	TAK	52,3	
Teijin PE	P22/017	1626	1	839,8	839,6	TAK	33,0	+/+
			2	840,6	840,5	TAK	31,0	
			3	829,9	829,7	TAK	23,0	
			4	839,7	839,6	TAK	23,5	
			5	841,5	841,5	TAK	13,0	
			6	838,6	838,4	TAK	21,0	

Odporność balistyczna próbki P22/0017 (o oznaczeniu materiału Teijin PE) dla poziomu K3C została potwierdzona, wszystkie pociski zostały zatrzymane, a deformacja podłoża mieściła się w dopuszczalnym przez normę zakresie. Największa wartość deformacji została zarejestrowana dla strzału nr. 1, wynosząca 33,0 mm, natomiast najmniejsza dla strzału nr. 5 o wartości 13,0 mm. Ocena wizualna panelu ochronnego Teijin PE nie wykazała uszkodzeń powłoki polimocznikowej w miejscach podparcia w obrębie strzałów, natomiast rozwarstwieniu uległ kompozyt oraz warstwa polimocznikowa wzdłuż krawędzi bocznej i dolnej próbki, jak pokazano to na zdjęciach na rysunku 5.13. Zaobserwowano również, że materiał absorbował energię uderzenia pocisku stosunkowo równomiernie na całej powierzchni panelu ochronnego.



Rys. 5.12. Zdjęcie próbki P22/016 po ostrzale. a) widok z tyłu, b) widok z tyłu od narożnika, c) podłoże balistyczne



Rys. 5.13. Zdjęcie próbki P22/017 po ostrzale. a) widok z tyłu, b) widok z tyłu od narożnika, c) podłoże balistyczne

5.13. Analiza wyników badań balistycznych prototypów przedprodukcyjnych

W wyniku zastosowanych rozwiązań wzmacniających konstrukcję, rezultaty badanych próbek wykazują spełnienie oczekiwań w zakresie zmniejszenia wartości deformacji podłoża. W przypadku próbki systemu Teijin PE średnia wartość deformacji podłoża wynosi 24 mm i zawiera się w przedziale od 13 mm do 33 mm, natomiast dla próbki systemu DSM PE 3 średnia wartość deformacji podłoża wynosi 41 mm i zawiera się w przedziale od 33,8 mm do 52,3 mm. Zgodnie z kryteriami normy PN-V-87000 próbka o numerze P22/017, tj. rozwiązanie Teijin PE, spełniła wymagania. Należy również podkreślić, że w przypadku tego rozwiązania materiałowego istnieje zapas bezpieczeństwa około 40% wartości maksymalnej deformacji podłoża tj. 40 mm.

Na podstawie tych samych kryteriów, próbka o numerze P22/016, reprezentująca system DSM PE 3, nie spełnia wymagań normy z powodu przekroczenia wartości deformacji

traumy po ostrzale nr 1, 5 i 6, dla których również średnia deformacja przekracza dopuszczalną wartość. Niemniej jednak, można w tym wypadku zauważyć, znaczną poprawę wartości odkształcenia traumy, rezultat ten dzięki zastosowania dodatkowych struktur energochłonnych zmniejszył średnią deformacji podłoża z 61 mm do 41 mm. Oczywiście należy wziąć pewne różnice wynikające z zastosowania plastelin o innych charakterystykach fizyko-mechanicznych, przewidzianych w normie NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000. Są one, jednakże, na tyle małe, by uznać ich pozytywny wpływ na redukcję deformacji.

5.14. Podsumowanie analizy wyników badań

Na podstawie uzyskanych wyników badań balistycznych nowo opracowanych prototypów przedprodukcyjnych wkładów sformułowano następujące wnioski:

- Ze wszystkich badanych systemów balistycznych, założone na początku dysertacji kryteria zostały spełnione przez rozwiązanie oznaczone jako Teijin PE.
- Głównym wymaganiem warunkującym dane rozwiązanie konstrukcyjne wkładu balistycznego jest jego niska masa jako czynnika najbardziej pożądanego na rynku, co ostatecznie determinuje dobór materiałów dla przyjętej technologii wytwarzania.
- Podejście do projektowania wkładów kamizelek kuloodpornych o określonej odporności balistycznej należy rozpatrywać ze względu na dwa aspekty. Pierwszy to osiągnięcie efektu w postaci braku penetracji, natomiast drugi to ograniczenie efektu traumy i jej skutków poprzez absorpcję energii uderzenia. Dopiero spełnienie obu tych warunków stanowi właściwy kierunek w opracowaniu personalnych osłon balistycznych.
- Ochrona wkładu kamizelkowego przed warunkami atmosferycznymi oraz oddziaływaniami mechanicznymi ma stosunkowo istotne znaczenie w kwestii wieloletniej eksploatacji wyposażenia ochronnego. Możliwość zastosowania powłoki polimocznikowej, nie tylko zapewnia ochronę dla kompozytu, ale również usztywnia i redukuje deformację.
- Układ materiałowy bazujący na rozwiązaniu DSM PE 3, w związku z dostępnym marginesem masy wynoszącym około 200 g w dalszym ciągu kwalifikuje się do modernizacji. W tym wypadku należy podjąć działania w zakresie zmniejszenia wartości deformacji podłoża balistycznego poprzez prace nad materiałem energochłonnym. Niemniej jednak dla celów niniejszej dysertacji, system ten nie

będzie już dalej rozpatrywany ze względu na wyniki analizy ekonomicznej tzn. stosunkowo wysokiej ceny produktu końcowego. Rozwiązanie, które nie spełniło badań weryfikacyjnych jest o 63% droższe względem systemu Teijin PE.

- Ocena wizualna próbek po badaniu ostrzałem wykazuje również zupełnie inne właściwości oddziaływania przez pocisk na strukturę kompozytu. Rozwiązanie Teijin PE pomimo ostrzału wielokrotnego zachowało względnie jednorodną strukturę tylnej powierzchni w zakresie jej odkształcenia. Zauważalne jest równomierne przeniesienie energii na strukturę całego kompozytu we wszystkich poziomach warstw (patrz rys. 5.13). Próbka układu DSM PE 3, natomiast uległa znacznemu zdeformowaniu, a uderzenia pocisków spowodowały uszkodzenia powłoki. W tym wypadku energia została skupiona w obszarze uderzenia pocisku (patrz rys. 5.12) i układ materiałowy nie rozproszył jej na kolejne warstwy kompozytu.

ROZDZIAŁ VI

Opracowanie technologii produkcji przemysłowej

Niniejszy rozdział przedstawia założenia i analizę procesu wdrożenia wkładu balistycznego do produkcji w zależności od oczekiwanej wielkości zapotrzebowania. W rozdziale przedstawiono cele i ramowy plan wdrożenia w zależności od wielkości produkcji. Określony został również schemat produkcyjny oraz proces kontroli jakości. Na końcu dokonano również analizy zagrożeń i ryzyka metodą SWOT dla planowanego procesu produkcji.

6.1. Opracowanie planu wdrożenia produkcji dla różnych etapów zapotrzebowania produkcyjnego

Potwierdzenie kluczowych parametrów balistycznych wkładu ochronnego w warunkach rzeczywistego testu poprzez badanie ostrzałem, na końcowym procesie weryfikacji technologii, należy uznać za spełnienie kryterium gotowości technologicznej na poziomie VI a nawet VII. W celu osiągnięcia zakładanego poziomu VIII, wymagane są wszystkie składowe gotowości do produkcji tj. dokumentacja techniczna i technologiczna oraz instrukcje użytkowania. W danym rozdziale przedstawiony zostanie plan wdrożenia produkcji opracowany ze względu na rozwój zapotrzebowania produkcyjnego.

W przypadku pozytywnej weryfikacji biznesowej danego przedsięwzięcia, partner przemysłowy oczekuje możliwości skalowalności produkcji oraz jej zwiększenia w przypadku wzrostu popytu na dane rozwiązanie. W danym zakresie zostały uwzględnione możliwości techniczne urządzeń jak również dobowy czas produkcji (tj. liczba zmian i personelu produkcyjnego).

Plan wdrożenia jest udokumentowanym procesem czynności i kroków, które należy podjąć, aby osiągnąć dany cel. Plan wdrożenia opracowany jest w celu dostarczenia przedsiębiorcy informacji niezbędnych do realizacji wdrożenia. Informacje te stanowią: cel i zakres wdrożenia, harmonogram prac, osoby odpowiedzialne oraz ryzyka. W opracowanym obecnie planie opisane zostały podstawowe kwestie wdrożenia technologii i produkcji bez szczegółowej analizy biznesowej, która to nie jest przedmiotem niniejszej rozprawy. Poniżej zdefiniowano poszczególne etapy planu wdrożenia:

6.1.1. Cele wdrożenia

Podstawowym celem danego procesu wdrożenia jest przygotowanie produkcji wkładów do kamizelek kuloodpornych opracowanych na podstawie dotychczasowych rezultatów badań w zależności od zakładanej wielkości produkcji.

Poczynione założenia dla produkcji wkładów uwzględniają:

- produkcję małoseryjną 10-100 szt./miesiąc,
- seryjną 101-1000 szt./miesiąc
- wielkoseryjną 1001-10 000 szt./miesiąc

6.1.2. Zasoby i zadania

W zakresie zasobów należy wyróżnić następujące grupy:

- zasoby niematerialne – know how, proces technologiczny,
- zasoby ludzkie,
- zasoby materialne tj. techniczne – sprzętowe, materiałowe, finansowe.

W zależności od przyjętej wielkości produkcji zasoby będą się zmieniały, stąd wskazana analiza ma za zadanie przedstawienie szacowanego poziomu zaawansowania zasobów oraz zaplanowanie zadań.

Do zasobów niematerialnych zaliczyć należy konstrukcję wyrobu oraz opracowany proces technologiczny, który jest tajemnicą przedsiębiorstwa firmy. Zdefiniowanie tego procesu pozwala na jego efektywną realizację oraz kontrolę w zakresie kluczowych parametrów.

Zasoby ludzkie możemy podzielić na poszczególne grupy:

- zarządzająca – osoby odpowiedzialne za nadzór nad prawidłową realizacją całego procesu produkcji i sprzedaży,
- handlu i logistyki – osoby weryfikujące możliwości sprzedaży i pozyskujące nowe zamówienia produkcyjne, jak również odpowiedzialne za zakupy materiałów produkcyjnych i logistykę,
- technologiczna – osoby posiadające kompetencje w zakresie nadzorowania i organizowania produkcji, odpowiedzialne za prawidłowy przebieg procesu technologicznego z uwzględnieniem zapisów z tego procesu.

- kontrolno – jakościowa – osoby posiadające kompetencje do planowania i zarządzania procesem kontroli jakości, jak również do oceny jakości międzyoperacyjnej i końcowego produktu.
- produkcyjna – osoby przeszkolone do wykonywania zadań produkcyjnych w zakresie procesu technologicznego.

Zasoby materialne stanowiąc będą przede wszystkim niezbędną infrastrukturę produkcyjną oraz niezbędne materiały do realizacji produkcji. W skład tych zasobów należy wyróżnić również przestrzeń produkcyjną, oprzyrządowanie technologiczne oraz niezbędne narzędzia kontrolno-pomiarowe. Zaplanowane do wdrożenia niezbędne zasoby zostały przedstawione w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Planowane podstawowe zasoby do planu drożenia w zależności od wielkości produkcji

Produkcja Zasoby	małoseryjna	seryjna	wielkoseryjna
Zasoby niematerialne	Konstrukcja wyrobu oraz opracowany proces technologiczny, (tajemnica przedsiębiorstwa firmy)*		
Zasoby ludzkie	Zarządzanie: 1 Handel i log.:1 Technologia: 1 K-J: 1 Produkcja: 2 Ilość zmian: 1	Zarządzanie: 1 Handel i log.:1 Technologia: 2 K-J: 3 Produkcja: 4 Ilość zmian: 2	Zarządzanie: 1 Handel i log.:2 Technologia: 3 K-J: 4 Produkcja: 42 Ilość zmian: 3
Zasoby materialne	<ul style="list-style-type: none"> • Powierzchnia produkcyjna: 200m2 • Prasa wysokociśnieniowa: 1 • Wycinarka laserowa: 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Powierzchnia produkcyjna: 200m2 • Prasa wysokociśnieniowa: 1 • Wycinarka laserowa: 1 	<ul style="list-style-type: none"> • Powierzchnia produkcyjna: 1200m2 • Prasa wysokociśnieniowa: 8-10 • Wycinarka laserowa: 7

* nie zależy od wielkości produkcji

Planowane zadania wdrożeniowe:

- 1) Wyszpecyfikowanie biznes planu i ustalenie początkowej wielkości produkcji.
– odpowiedzialny Zarząd i kadra kierownicza firmy.
- 2) Przeprowadzenie procesu rekrutacyjnego do zabezpieczenia zasobów ludzkich.
– odpowiedzialny Zarząd i kadra kierownicza firmy.
- 3) Przeprowadzenie działań marketingowych i pozyskanie zamówień początkowych, jak również ocena i uzupełnienie zasobów materialnych w przypadku produkcji wielkoseryjnej.
– odpowiedzialny dział handlowy i logistyki.
- 4) Zaplanowanie produkcji i procesów technologicznych.
– odpowiedzialny dział technologiczny.
- 5) Zaplanowanie procesów jakościowych międzyoperacyjnych i odbioru końcowego.
– dział kontroli jakości.
- 6) Zakup materiałów według zamówień produkcyjnych.
– odpowiedzialny dział handlowy i logistyki.
- 7) Realizacja produkcji według ustalonego procesu i wielkości produkcji
– odpowiedzialny dział produkcji.
– odpowiedzialny dział technologiczny.
– dział kontroli jakości.

Termin realizacji poszczególnych zadań zależy od wielkości produkcji i wymagań klienta ustalonych w drodze negocjacji, potwierdzonych w zamówieniu.

6.1.3. Schemat produkcji

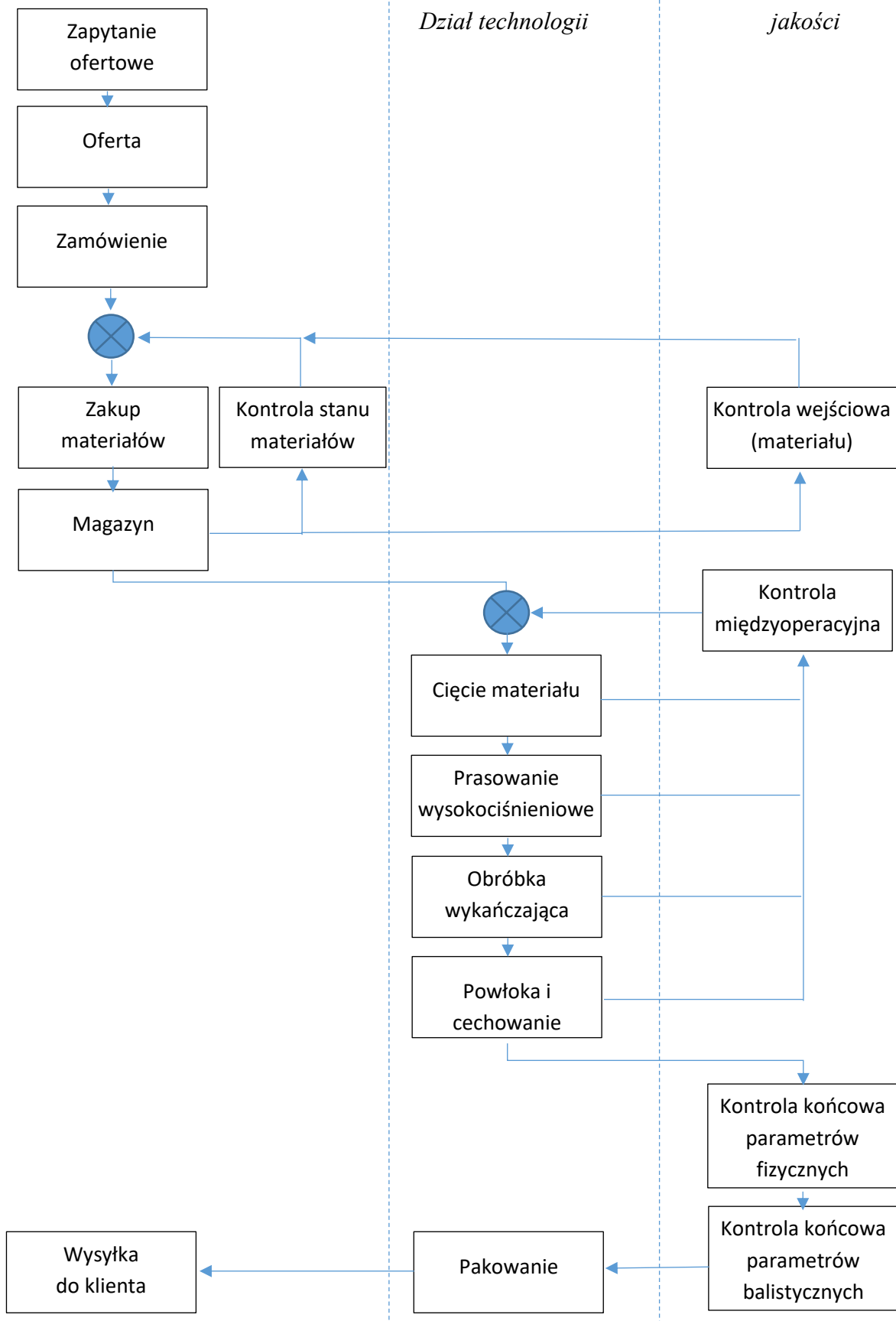
Organizacja produkcji musi zapewnić stabilność procesów technologicznych oraz powtarzalność produkowanych wyrobów. Aby spełnić ten cel należy w procesie produkcyjnym uwzględnić i połączyć ze sobą trzy obszary tj. produkcję pod nadzorem technologicznym, kontrolę jakości oraz logistykę.

Sprawnie funkcjonujący mechanizm produkcji wymaga monitoringu w systemie pętli, na zasadzie sprawnego regulatora, który stabilizuje ten proces i w przypadku wystąpienia jakichkolwiek odstępstw technologicznych bądź jakościowych koryguje go w odpowiedni sposób. Opracowany schemat produkcji został przedstawiony na rys. 6.1.

Dział handlu i logistyki

*Dział produkcji
Dział technologii*

*Dział kontroli
jakości*



Rys. 6.1. Schemat produkcji wkładów balistycznych

6.1.4. Zarządzanie jakością

Wymagania postawione dla zakładu produkcyjnego w danym obszarze technologii bezpieczeństwa musi spełniać przynajmniej normę ISO 9001 [82]. Ważnym aspektem jest również wdrożenie odpowiednich wymagań jakościowych dla produkcji o przeznaczeniu wojskowym i policyjnym jak norma AQAP 2110 [83] oraz dopuszczenie do obrotu i produkcji w postaci koncesji MSW.

Założony proces kontrolno-jakościowy przewidziany dla danego procesu produkcji składa się z następujących etapów:

- Kontrola wejściowa – kontrola otrzymanej od producenta dokumentacji jakościowej dla każdej partii materiałowej oraz weryfikacja wizualna i podstawowych parametrów materiałowych.
- Kontrola międzyoperacyjna – weryfikacja statystyczna dla każdego procesu produkcyjnego, w zakresie której wchodzi kontrola wymiarowa i masowa dla poszczególnych etapów.
- Kontrola końcowa parametrów fizycznych – ocena wizualna i pomiar parametrów fizycznych (kontrola wymiarowa i masowa na podstawie dokumentacji konstrukcyjnej).
- Kontrola końcowa parametrów balistycznych – sprawdzenie cech balistycznych w laboratorium akredytowanym, dla każdej partii zgodnie z zapisami normy PN-V-87000.

6.1.5. Ryzyka i zagrożenia

Ocenę ryzyka i zagrożeń przeprowadzono stosując analizę SWOT [84]. Analiza SWOT opracowana została w latach 50 i 60 XX wieku przez naukowców i konsultantów biznesowych pracujących w Harvard Business School. „SWOT” pochodzi od angielskich słów *strengths* (mocne strony), *weaknesses* (słabe strony), *opportunities* (szanse potencjalne lub zaistniałe w otoczeniu), *threats* (zagrożenia prawdopodobne lub istniejące w otoczeniu).

Tabela 6.2. Analiza SWOT procesu produkcji wkładów balistycznych

	MOCNE STRONY	Stopień wykorzystania	Działania doskonalące	SŁABE STRONY	Waga Znaczące/ Nieznaczące	Działania zapobiegawcze
Czynniki wewnętrzne związane z firmą	- Wykształcenie, doświadczenie i stabilność zatrudnienia kadry	Znaczący	Szkolenia wewnętrzne i zewnętrzne kadry	Brak wykwalifikowanych pracowników produkcyjnych	Znaczący	Internetowe giełdy pracy
	- Atrakcyjne/konkurencyjne ceny produktów	Znaczący	Utrzymanie ciągłości cen, obniżenie kosztów produkcji			
	- Konkurencyjność produktów	Znaczący	Wykorzystywany atut w negocjacjach z klientami	Kompetencje kandydatów do pracy	Znaczący	Szkolenia
	- Sprawny park maszynowy	Znaczący	Systematyczne przeglądy maszyn			
	- Własna technologia	Znaczący	Wykorzystywany atut w negocjacjach z klientami			
	- Posiadanie certyfikatów ISO 9001,14001,45001, AQAP, WSK	Znaczący	Wykorzystywany atut w negocjacjach z klientami			
	- Nowoczesne laboratorium balistyczne	Znaczący	Utrzymanie stałej współpracy poprzez zapewnienie jakości, terminowości i cen			
	SZANSE	Stopień wykorzystania	Działania doskonalące	ZAGROŻENIA	Waga Znaczące/ Nieznaczące	Działania zapobiegawcze
Czynniki zewnętrzne związane z firmą	Zwiększenie sprzedaży	Znaczący	Uczestnictwo w targach branżowych	Terminowość dostaw materiałów	Nieznaczący	Umowy ramowe z dostawcami Zabezpieczenie magazynu buforowego oraz wdrażanie nowych materiałów Możliwość zatrudnienia pracowników kontraktowych.
	Nawiązanie stałej współpracy z nowymi klientami	Znaczący		Ograniczenia na rynku materiałów	Znaczący	
	Optymalizacja procesów technologicznych	Znaczący	Utrzymanie ciągłości cen, obniżenie kosztów produkcji	Absencja pracowników	Znaczący	

6.2. Możliwości dalszego rozwoju konstrukcji opracowanego wkładu

Opracowana konstrukcja uniwersalnego wkładu balistycznego do kamizelki kuloodpornej z stanowi bazę do jego rozwoju na wyższe poziomy ochronne. Poniżej przedstawiono oczekiwane kierunki rozwoju systemów balistycznych celem zwiększenia ochrony balistycznej:

- 1) Konstrukcja stalowo-polietylenowa (oczekiwana odporność PN-V-87000 poziomu K3-A,B,C) – zakładana masa projektowa do 2,6 kg.

Wykorzystując otrzymane poprzez prasowanie polietylenowe półprodukty można dokonać zwiększenia odporności do wyższego poziomu przy akceptowalnym oraz konkurencyjnym poziomie masowym. Rozwiązanie z zastosowaniem stali jest rozwiązaniem ekonomicznym.

- 2) Konstrukcja polietylenowo ceramiczna (oczekiwana odporność NIJ 0101.06 poziomu IV lub PN-V-87000 poziomu K4) - zakładana masa projektowa nie powinna przekroczyć 2,5 kg.

W tym przypadku, w wyniku połączenia bazy UHMWPE z wybranymi półfabrykatami ceramicznymi istnieje duże prawdopodobieństwo uzyskania odporności balistycznej na pociski karabinowe z rdzeniem przeciwpancernym. Technologia wytwarzania kompozytów metodą prasowania i metodą próżniową powinna, również w zadowalającym stopniu, spełnić wymagania jakościowe i możliwość implementacji do produkcji seryjnej.

ROZDZIAŁ VII

Podsumowanie i wnioski

Potrzeby rozwojowe w zakresie kompozytowych struktur ochronnych stanowią obecnie jeden z głównych kierunków badawczo-rozwojowych technologii militarnych. W niniejszej dysertacji, wpisującej się we współczesne kierunki rozwojowe, przedstawiono ścieżkę postępowania do osiągnięcia głównego celu jakim było opracowania konstrukcji uniwersalnego wkładu balistycznego do kamizelki kuloodpornej.

Formuła „doktoratu wdrożeniowego” wymagała od autora analizy wymagań partnera przemysłowego, w moim przypadku firmy CFT Precyzja Sp. z o.o., a następnie po spełnieniu postawionych założeń, przygotowanie do uruchomienia produkcji wyrobu. W rozprawie dokonano analizy trendu produktów dostępnych na rynku, sformułowano główne założenia dla opracowanej konstrukcji, następnie zaplanowano i zrealizowano badania, których celem było wyłonienie struktur o stosunkowo najlepszych parametrach balistycznych i użytkowych. Podjęto również próbę opracowania metodyki badawczej pozwalającej dokonanie analizy porównawczej dla tkanin stanowiących zbrojenie laminatu balistycznego. Dzięki wytworzenie uproszczonych modeli wkładów balistycznych, stopniowej ich modyfikacji, aż do wyprodukowania pełnowymiarowych prototypów i reprezentatywnej partii produkcyjnej, osiągnięto postawiony cel główny rozprawy. Realizacja kolejnych punktów zadań badawczych i analiza pozyskanych danych potwierdziła poprawność i skuteczność zrealizowanych przedsięwzięć.

Końcowym rezultatem analiz literaturowych i badań doświadczalnych jest **opracowanie twardego wkładu kompozytowego do kamizelek kuloodpornych**, który spełnia podstawowe założenia postawione przez przedsiębiorcę, firmę CFT Precyzja Sp. z o.o., tj.:

- konkurencyjność układu pod względem masowym, wynikająca z analizy trendu,
- odporność balistyczna na pociski broni karabinowej spełniające wymagania normy PN-V-87000 lub NIJ 0101.06.
- wykorzystanie obecnie stosowanych technologii produkcyjnych firmy.

W ten sposób osiągnięto wdrożeniowy cel rozprawy i udowodniono hipotezę wdrożeniową pracy.

Na podstawie uzyskanych rezultatów **potwierdzono, że opracowany wkład balistyczny bazujący na rozwiązaniu Teijin PE spełnia wszystkie postawione założenia**, tj., charakteryzuje się następującymi parametrami:

- masa własna: 1,6 kg,
- powierzchnia ochronna: 0,068 m²,
- gęstość powierzchniowa: 23,9 kg/m²,
- potwierdzony badaniami balistycznymi poziom ochrony balistycznej: PN-V-87000 klasy K3C (pocisk broni karabinowej 7,62 x 51 NATO BALL M80),
- wykonano z zastosowaniem technologii firmy partnera przemysłowego – CFT Precyzja Sp. z o.o.

Przeprowadzone badania eksperymentalne, porównawcze i analizy wyników pozwalają na sformułowanie następujących wniosków końcowych:

- Hipoteza badawcza o korelacji pomiędzy cechami balistycznymi tkaniny do produkcji laminatów balistycznych, a jej właściwościami wytrzymałościowymi określonymi w warunkach obciążenia quasi-statycznego nie została udowodniona, a rezultaty nie dały oczekiwanej zbieżności wyników. Nie stwierdzono zależności pomiędzy parametrami mechanicznymi tkaniny w przeliczeniu na masę powierzchniową układu a zdolnościami laminatu balistycznego do absorpcji energii uderzenia pocisku.
- Wpływ na cechy balistyczne ma nie tylko rodzaj zastosowanego materiału bazowego w postaci tkaniny, ale również zastosowana technologia produkcji. Charakterystyka materiałów zmienia się w zależności od wpływu zastosowania określonej technologii wytwórczej.
- Opracowana autorska metodyka badania tkanin do wkładów balistycznych umożliwia otrzymanie powtarzalnych i miarodajnych wyników, co może posłużyć do jej rozwoju i kontynuacji prac nad powiązaniem cech mechanicznych i balistycznych tkanin.
- Ze wszystkich badanych systemów balistycznych, założone na początku dysertacji kryteria zostały spełnione przez rozwiązanie oznaczone jako Teijin PE.
- Kluczową cechą rozwiązań konstrukcyjnych wkładów balistycznych jest ich niska masa jako czynnik najbardziej pożądanym na rynku, co ostatecznie determinuje dobór materiałów dla przyjętej technologii wytwarzania.
- Podejście do projektowania wkładów kamizelek kuloodpornych o określonej odporności balistycznej należy rozpatrywać ze względu na dwa aspekty. Pierwszy to osiągnięcie efektu w postaci braku penetracji, natomiast drugi to ograniczenie efektu traumy i jej skutków poprzez absorpcję energii uderzenia. Dopiero spełnienie tych obydwóch warunków stanowi właściwy kierunek w opracowaniu personalnych osłon balistycznych.

- Ochrona wkładu kamizelkowego przed warunkami atmosferycznymi oraz oddziaływaniami mechanicznymi ma stosunkowo istotne znaczenie w kwestii wieloletniej eksploatacji sprzętu ochronnego. Możliwość zastosowania powłoki polimocznikowej, nie tylko zapewnia ochronę dla kompozytu, ale również usztywnia i redukuje deformację.
- Ocena wizualna próbek po badaniu ostrzałem wykazuje również zupełnie różne zachowanie się struktury kompozytu w warunkach uderzenia pociskiem karabinowym. Rozwiązanie Teijin PE pomimo ostrzału wielokrotnego zachowało względnie jednorodną strukturę tylnej powierzchni w zakresie jej odkształcenia. Zauważalne jest równomierne przeniesienie energii na strukturę całego kompozytu we wszystkich poziomach warstw. Natomiast próbka układu DSM PE 3 uległa znacznemu zdeformowaniu, a uderzenia pocisków spowodowały uszkodzenia powłoki. W tym wypadku energia została skupiona w obszarze uderzenia pocisku i układ materiałowy nie rozproszył jej na kolejne warstwy kompozytu. Efekt ten został zobrazowany na rysunkach 5.12 i 5.13 w rozdziale 5.

Najważniejsze osiągnięcia naukowo-badawcze pracy:

- Opracowanie metody autorskiej i stanowiska badawczego do badania quasi-statycznego tkanin włóknistych jako materiałów zbrojenia kompozytu balistycznego.
- Zaprojektowanie uchwytu do badania tkanin z systemem naciągu.
- Szczegółowa analiza materiałów kompozytowych, stosowanych na osłony balistyczne.
- Przeprowadzenie badań właściwości balistycznych szerokiej gamy tkanin włóknistych.
- Przedstawienie sposobu projektowania i doboru materiałów do opracowania konkurencyjnych wkładów ochrony personalnej.
- Przeprowadzenie badań balistyczne wkładów kompozytowych z wykorzystaniem metod normatywnych.
- Opracowanie technologii i wytworzenie balistycznych wkładów kompozytowych.
- Wdrożenie wyników pracy w zakresie struktur kompozytowych w firmie produkcyjnej CFT Precyzja Sp. z o.o.

Kierunki dalszych badań w celu rozwoju konstrukcji wkładu balistycznego:

Otrzymane wyniki badań pozwalają na wskazanie dalszych kierunków prac badawczo-rozwojowych, które mogą przyczynić się do dalszego poszukiwania relacji pomiędzy właściwościami fizyko-mechanicznymi materiału bazowego a właściwościami balistycznymi

kompozytu balistycznego w konstrukcji wkładu balistycznego. W związku z powyższym dalsze prace powinny być kontynuowane w następujących obszarach:

- wpływu właściwości pojedynczego włókna użytego do tkaniny użytej do produkcji kompozytu na odporność balistyczną danego rozwiązania balistycznego,
- wpływu liczby warstw użytych do pakietowania próbek,
- określenia różnic we właściwościach fizyko-mechanicznych oraz balistycznych dla materiałów próbek przed i po zastosowaniu technologii końcowej produkcji danej konstrukcji,
- powiązanie właściwości fizyko-mechanicznych tkaniny wynikających z zastosowanej technologii produkcji kompozytu, a energią pochłaniania wyrażoną wielkością parametru deformacji podłoża balistycznego (plasteliny).

Zakończenie prac badawczych w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej zbiegło się z zapowiedzią producenta materiału użytego do rozwiązania Teijin PE o zakończeniu jego produkcji. W związku z powyższym, konieczna jest kontynuacja badań w zakresie doboru zamiennika materiałowego z grupy UHMWPE. Dzięki przebadaniu w ramach doktoratu znacznej liczby materiałów możliwe jest wytypowanie co najmniej jednego rozwiązania materiałowego, które może zastąpić opracowane rozwiązanie. Zbadany układ materiałowy bazujący na materiale DSM PE 3 posiada zapas masowy, ok. 200 g w stosunku do postawionych wymagań, dlatego kwalifikuje się on do dalszych prac rozwojowych. W tym wypadku należy podjąć działania w zakresie zmniejszenia wartości deformacji podłoża balistycznego, na przykład, poprzez dalsze prace badawczo-rozwojowe nad materiałem energochłonnym lub zwiększeniem warstw tkaniny zbrojeniowej.

Planowany dalszy rozwój opracowanej konstrukcji bazowej wkładu balistycznego będzie ukierunkowana na dobór stali pancernej lub warstwy ceramicznej celem opracowania wkładów o wyższym poziomie ochrony balistycznej.

Spis Tabel

1. **Tabela 1.1.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg NIJ 0101.06
2. **Tabela 1.2.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg PN-V-87000
3. **Tabela 1.3.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg HOSDB Body Armor Standards (2007) UK
4. **Tabela 1.4.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg Technische Richtlinie March 2008
5. **Tabela 1.5.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg VPAM 2006
6. **Tabela 1.6.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg GOST R 50744-95
7. **Tabela 1.7.** Poziomy odporności balistycznej, warunki wykonywania testów i kryteria oceny wg GA141-2010
8. **Tabela 1.8.** Porównanie wybranych parametrów fizyko-mechanicznych oraz względnej zdolność pochłaniania energii dla wybranych włókien stosowanych we wkładach balistycznych
9. **Tabela 2.1.** Konstrukcje wkładów balistycznych z podstawowymi parametrami
10. **Tabela 4.1.** Gęstość i właściwości mechaniczne materiałów włóknistych do zastosowań balistycznych
11. **Tabela 4.2.** Wytypowane materiały bazowe
12. **Tabela 4.3.** Zestawienie przygotowanych próbek do badań statycznych
13. **Tabela 4.4.** Zestawienie przygotowanych próbek do badań cech balistycznych
14. **Tabela 4.5.** Zestawienie układów materiałowych w pakietach do prasowania
15. **Tabela 4.6.** Zestawienie wyników pomiarów geometrycznych i masowych układów materiałowych po prasowaniu
16. **Tabela 4.7.** Tabelaiczne zestawienie wyników pomiarów próbek i przeprowadzonych prób
17. **Tabela 4.8.** Porównanie procedur oceny wg NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000
18. **Tabela 5.1.** Tabelaiczne zestawienie wyników pomiarów próbek i przeprowadzonych prób
19. **Tabela 5.2.** Wyznaczenie prędkości V_{50} przedstawione na przykładzie próbki P22/298
20. **Tabela 5.3.** Zestawienie wyników parametru V_{50} dla poszczególnych próbek
21. **Tabela 5.4.** Zestawienie wyników obciążeń quasi statycznych z wynikami parametru balistycznego V_{50} dla próbek materiałów włóknistych
22. **Tabela 5.5.** Warunki badań zgodnie ze standardem NIJ 0101.06
23. **Tabela 5.6.** Warunki badań zgodnie ze standardem PN-V-87000
24. **Tabela 5.7.** Wyniki badań wg normy NIJ 0101.06 p. III (po modyfikacji) na uproszczonych modelach wkładów

25. **Tabela 5.8.** Wyniki badań wg normy PN-V-87000:2011 (po modyfikacji) na uproszczonych modelach wkładów. Wynik w postaci liczbowej oznacza wartość deformacji podłoża balistycznego w mm
26. **Tabela 5.9.** Zestawienie danych wymiarowych i masowych układów materiałowych w pakietach do prasowania
27. **Tabela 5.10.** Zestawienie układów materiałowych po prasowaniu i wykończeniu
28. **Tabela 5.11.** Wyniki badań wg normy NIJ 0101.06 p. III (po modyfikacji) wkładów prototypowych
29. **Tabela 5.12.** Zestawienie pomiarów geometrycznych i masowych układów materiałowych w pakietach do prasowania
30. **Tabela 5.13.** Zestawienie pomiarów geometrycznych i masowych wkładów w pakietach po prasowaniu
31. **Tabela 5.14.** Zestawienie pomiarów geometrycznych i masowych gotowych prototypów wkładów balistycznych do badań weryfikacyjnych
32. **Tabela 5.15.** Wyniki badań wg normy PN-V-87000 poziomu K3C dla prototypowych wkładów przedprodukcyjnych po modyfikacji rozwiązania konstrukcyjnego i technologicznego
33. **Tabela 6.1.** Planowane podstawowe zasoby do planu drożenia w zależności od wielkości produkcji
34. **Tabela 6.2.** Analiza SWOT procesu produkcji wkładów balistycznych

Spis Rysunków

1. **Rys. 1.1.** Odłamek kalibru .22 – 1.1g (do ostrzału bez sabotu)
2. **Rys. 1.2.** Schemat testu DOP
3. **Rys. 1.3.** Schemat układu badawczego B. Hopkinsona w postaci wahadła balistycznego
4. **Rys. 1.4.** Schemat układu badawczego odwrotnego testu balistycznego
5. **Rys. 1.5.** Układ do badań udarowych o niskiej prędkości z swobodnie podpartymi warunkami brzegowymi do płaskich paneli UHMWPE. Schemat mocowania (a) bez próbki, (b) widok z boku z próbką i (c) na miejscu na wieży do obciążników Dyantup z zamocowaną próbką i penetratorem kulistym o średnicy 5,1 cm
6. **Rys. 1.6.** Wielowarstwowe podejście do przeżywalności
7. **Rys. 1.7.** Pocisk, który uległ tzw. grzybkowaniu podczas penetracji miękkiego wkładu aramidowego
8. **Rys. 2.1.** Średnia powierzchnia ochronna wkładów balistycznych
9. **Rys. 2.2.** Masa własna wkładów balistycznych
10. **Rys. 2.3.** Średnia masa własna wkładów balistycznych zastosowanych układów materiałowych oraz poziomów balistycznych
11. **Rys. 2.4.** Średnia gęstość powierzchniowa wkładów balistycznych
12. **Rys. 2.5.** Widok strefy ostrzału w laboratorium balistycznym firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.
13. **Rys.3.1.** Schemat działań do udowodnienia hipotezy i osiągnięcia celów
14. **Rys. 4.1.** Porównanie wytrzymałości właściwej i modułu sprężystości właściwej przy rozciąganiu dla materiałów włóknistych przewidzianych do zastosowań balistycznych
15. **Rys. 4.2.** Wykres porównawczy kosztu materiałowego dla szacunkowego rozwiązania o masie 1600 g
16. **Rys. 4.3.** Ploter laserowy do tkanin firmy AEON służący do wytwarzania układów materiałowych
17. **Rys. 4.4.** Geometria kształtu próbki wykonanej z tkaniny zbrojeniowej do badań cech balistycznych
18. **Rys. 4.5.** Prasa wysokociśnieniowa użyta do wytwarzania rozwiązań konstrukcyjnych
19. **Rys. 4.6.** Wkłady balistyczne wstępnych (uproszczonych) modeli konstrukcyjnych po prasowaniu wysokociśnieniowym i trymowaniu krawędzi zewnętrznych
20. **Rys. 4.7.** Układ mocujący próbkę z systemem samo-naciągu – część górna
21. **Rys. 4.8.** Układ mocujący próbkę z systemem samo-naciągu – część dolna
22. **Rys. 4.9.** Wymagany kształt i wielkość próbki pojedynczej warstwy
23. **Rys. 4.10.** Narzędzia do punktowego obciążenia tkaniny (penetratorów) o promieniu:
a) $R=5\text{mm}$; b) $R=1\text{mm}$; c) $R=10\text{mm}$
24. **Rys. 4.11.** Rysunek złożeniowy układu mocowania tkaniny balistycznej
25. **Rys. 4.12.** Widok układu mocowania tkaniny balistycznej zamocowanego na maszynie wytrzymałościowej
26. **Rys. 4.13.** Zdjęcie ułożenia próbki na części dolnej układu mocującego próbkę
27. **Rys. 4.14.** Schemat stanowiska eksperymentalnego stosowanego do badań balistycznych na odporność balistyczną V_{50}

28. **Rys. 4.15.** Przykład wzoru ostrzału do „dużej” miękkiej próbki (1,1 g FSP)
29. **Rys. 5.1.** Zestawienie wpływu docisku próbki (25Nm i 50Nm) na przebieg ugięcia o zadanym obciążeniu z wykorzystaniem narzędzia R10
30. **Rys. 5.2.** Wpływ różnych narzędzi do badania poprzez obciążenie punktowe próbki Teijin UD
31. **Rys. 5.3.** Zestawienie wyników dla próbek w układzie 1 warstwy
32. **Rys. 5.4.** Zestawienie wyników dla próbek w układzie 2 warstw
33. **Rys. 5.5.** Stanowisko badawcze do ostrzały odłamkiem standardowym FSP
34. **Rys. 5.6.** Przykład próbki materiałowej o ozn. P22/298, poddanej badaniu balistycznemu. a) próbka przed ostrzałem, b) próbka po ostrzale
35. **Rys. 5.7.** Przykład próbek po badani u wg NIJ 0101.06. a) tylna strona próbki P21/054 bez penetracji; b) plastelinowe podłoże próbki P21/054 bez penetracji; c) tylna strona próbki P21/055 z penetracją; d) plastelinowe podłoże próbki P21/055 z penetracją strzałów nr. 1 i 3
36. **Rys. 5.8.** Przykład próbek po badani u wg PN-V-87000 a) tylna strona próbki P21/058 bez penetracji; b) plastelinowe podłoże próbki P21/058 bez penetracji; c) tylna strona próbki P21/057 z całkowitą penetracją; d) plastelinowe podłoże próbki P21/057 z całkowitą penetracją
37. **Rys. 5.9.** Wykończone próbek prototypowych wkładów
38. **Rys. 5.10.** Zdjęcie próbki P21/050 po ostrzale. a) widok z przodu, b) widok z tyłu, c) podłoże balistyczne
39. **Rys. 5.11.** Widok przedprodukcyjnych wkładów prototypowych z wykończeniem powłoką ochronną a) 22/016 –układ DSM PE 3; b) 22/017 – układ Teijin PE
40. **Rys. 5.12.** Zdjęcie próbki P22/016 po ostrzale. a) widok z tyłu, b) widok z tyłu od narożnika, c) podłoże balistyczne
41. **Rys. 5.13.** Zdjęcie próbki P22/017 po ostrzale. a) widok z tyłu, b) widok z tyłu od narożnika, c) podłoże balistyczne
42. **Rys. 6.1.** Schemat produkcji wkładów balistycznych

Bibliografia

- [1] <https://www.gov.pl/web/edukacja-i-nauka/doktoraty-wdrozeniowe---czyli-jak-wygrac-trzy-razy> (dostęp 10.05.2021).
- [2] Mulat Alubel Abteu, François Boussua, Pascal Bruniaux, "Dynamic impact protective body armour: A comprehensive appraisal on panel engineering design and its prospective materials", *Defence Technology* 17 (2021) 2027-2049.
- [3] Messiry M El, El-tarfawy S. "Performance of weave structure multi-layer bulletproof flexible armor. In: The 3rd conference of the national campaign for textile industries, NRC cairo, 'Recent manufacturing technologies and human and administrative development' "; 2015. p. 218e25. Cairo.
- [4] Bajaj P. "Ballistic protective clothing: an overview", *Indian J. Fibre Text Res.* 1997; 22:274e91.
- [5] Chen Xiaogang, Yang Dan. "Use of 3D angle-interlock woven fabric for seamless female body Armour : Part I :Ballistic evaluation", *Textil Res J*, 2010: 1e8.
- [6] Othman AR, Hassan MH., "Effect of different construction designs of aramid fabric on the ballistic performances.", *Mater Des*, 2013;44:407e17.
- [7] Cunniff PM. "An analysis of the system effects in woven fabrics under ballistic impact." *Textil Res J*, 1992; 62:495e509.
- [8] Bolduc M, Lazaris A. "Spider silk-based advanced performance fiber for improved personnel ballistic protection systems." DRDC Valcartier Technical; Memorandum TM 2002:2002e222.
- [9] Chen X, Zhou Y. "Technical textiles for ballistic protection. In: Handbook of technical textiles." Elsevier Ltd., 2016, pp. 169e192.
- [10] Yang HH. "Kevlar aramid fiber." New York: John Wiley; 1992.
- [11] Crouch IG, Arnold L, Pierlot A, "Fibres, textiles and protective apparel." Elsevier Ltd. Epub ahead of print 2017. DOI: 10.1016/b978-0-08-1007044.00006-2.
- [12] Sławomir Łotysz, „Historia sporu o pewien wynalazek. Jan Szczepanik, Kazimierz Żegleń i kamizelka kuloodporna”, „*Analecta* 18/1-2(35-36)”, 2009, s. 349-366.
- [13] Teresa Kowalik, Przemysław Słowiński, „Królewski dar. Co Polacy dali światu”, *Zona Zero* 2020.
- [14] NIJ Standard – 0101.06 - Ballistic Resistance of Body Armor, 07/2008.
- [15] PN-V-87000:2011 - Osłony balistyczne lekkie -- Kamizelki kulo- i odłamkoodporne -- Wymagania ogólne i badania, 08/2011.

-
- [16] AEP-2920, Edition A Version 2, PROCEDURES FOR THE EVALUATION AND CLASSIFICATION OF PERSONAL ARMOUR, 09/2016.
- [17] HOSDB Body Armor Standards, Centre for Applied Science and Technology (CAST), 2007.
- [18] Technische Richtlinie - Ballistische Schutzwesten, March 2008
- [19] VPAM BSW 2006, *PRÜFRICHTLINIE "Ballistische Schutzwesten"*, Deutsche Hochschule der Polizei Polizeitechnisches Institut, 14.05.2009.
- [20] GOST R 50744-95 „Armour clothes. Classification and general technical requirements”, 2/27/1995.
- [21] GA 141-2010, „Police ballistic resistance of body armor”, 2010-12-01 .
- [22] <https://www.teijinaramid.com/en/ballistic-standards-app/> (dostęp 10.05.2021).
- [23] Hazell, P. J. “Measuring the strength of brittle materials by depth-of-penetration testing.” *Advances in Applied Ceramics* 109 (8):504–510. 2010.
- [24] Hazzel Paul J., „ARMOUR – Materials, Theory, and Design”, CRC PressTaylor & Francis Group, 2016.
- [25] Hopkinson, B., *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 213 (10):437–452, 1914.
- [26] Orphal, D. L., R. R. Franzen, A. J. Piekutowski, and M. J. Forrestal. “Penetration of confined aluminum nitride targets by tungsten long rods at 1.5–4.5 km/s.”, *International Journal of Impact Engineering* 18 (4):355–368. 1996.
- [27] Jeffrey M. Staniszewski *, Steven E. Boyd , Travis A. Bogetti; A multi-scale modeling approach for UHMWPE composite laminates with application to low-velocity impact loading; *International Journal of Impact Engineering* 159 (2022) 104031
- [28] Leszek Radziszewski, „Balistyka końcowa pocisków amunicji małokalibrowej przy strzelaniu do wybranych celów”, Politechnika Świętokrzyska, Kielce 2007.
- [29] <https://www.dupont.pl/kevlar/what-is-kevlar.html> [12.01.2022] .
- [30] <https://www.teijinaramid.com/en/expertise/what-is-aramid> [12.01.2022] .
- [31] <https://www.dyneema.com/experience-more/the-science-of-dyneema> [12.01.2022] .
- [32] Feilong Han, Chenghao Wang, Ya Zhang, Ziyu Wang, Hangyu Yue, Lishuai Zong, Jinyan Wang, Xigao Jian, “The investigation and fabrication of novel ballistic composites with checkerboard-shaped lay-up design to improve ballistic performances”, *Composites Science and Technology*, Volume 249, 2024.
- [33] Hogg P. J., *Composites for ballistic applications*, J. of Composites Processing, CPA, Bromsgrove U. K., 2003, <http://www.composites-proc-assoc.co.uk/view.php?pid=24>.
- [34] Tarkowska S., Łandwijt M., „Aramidowe pakiety tkaninowe skuteczną ochroną przed pociskami pistoletowymi 9 mm PARA FMJ wg zmodyfikowanego modelu Iwljewa”,

-
- Problemy Techniki Uzbrojenia s. 103—114, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia 2006.
- [35] Yihui Zhu, Jie Ma, Zhuangqing Fan, Yaoke Wen, Cheng Xu, Min Xia, “Ballistic impact performance and blunt injury assessment of ceramic/UHMWPE laminate composite body armor”, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 29, 2024, Pages 1703-1728.
- [36] https://web.archive.org/web/20130527141415/http://www.militech.sownet.pl/pdw/pdw_main.html (29.01.2022) .
- [37] Wiśniewski A., *Pancerze-budowa, projektowanie i badanie*, WNT, Warszawa 2001.
- [38] “Guide body armor” U.S. Department of Justice, 12/2014.
- [39] Cheeseman, B. A., and T. A. Bogetti. Ballistic impact into fabric and compliant composite laminates. *Composite Structures* 61 (1–2):161–173. 2003.
- [40] Tabiei, A., and G. Nilakantan.. Ballistic impact of dry woven fabric composites: A review. *Applied Mechanics Reviews* 61 (1):010801. 2008.
- [41] Abrate, S. Impact on laminated composite materials. *Applied Mechanics Reviews* 44 (4):155–190. 1991.
- [42] Prosser, R. A., S. H. Cohen, and R. A. Segars. 2000. Heat as a factor in the penetration of cloth ballistic panels by 0.22 caliber projectiles. *Textile Research Journal* 70 (8): 709–722.
- [43] Cunniff, P. M. Dimensionless parameters for optimization of textile-based body armor systems. *Proceedings of the 18th International Symposium on Ballistics*, San Antonio, TX, 15–19 November. 1999.
- [44] Murat Aydin, M. Kemal Apalak, “Experimental damage analysis of Al/SiC functionally graded sandwich plates under ballistic impact”, *Materials Science and Engineering: A*, Volume 671, 2016, Pages 107-117.
- [45] Kemal Arslan, Recep Gunes, “Penetration mechanics of ceramic/metal functionally graded plates under ballistic impact: An experimental perspective”, *Composite Structures*, Volume 331, 2024.
- [46] Run-wei Zhang, Zhen-long Chao, Long-tao Jiang, Sheng-peng Chen, Zhi-wei Wang, Shan-qi Du, Tian Luo, Hui-min Han, Bing-zhuo Han, Guo-qin Chen, Yong Mei, Gao-hui Wu, „Ballistic performance and mechanism of B4C/Al laminated targets with different configurations”, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 27, 2023, Pages 7807-7822.
- [47] Pengcheng Hu, Yuansheng Cheng, Pan Zhang, Jun Liu, Haifu Yang, Jianyong Chen, “A metal/UHMWPE/SiC multi-layered composite armor against ballistic impact of flat-nosed projectile”, *Ceramics International*, Volume 47, Issue 16, 2021, Pages 22497-22513.

-
- [48] Galiński C, „Wybrane Zagadnienia Projektowania Samolotów”, Biblioteka Instytutu Lotnictwa, Warszawa 2016.
- [49] Yonghua Shen, Yangwei Wang, Shaofeng Du, Zhikun Yang, Huanwu Cheng, Fuchi Wang, “Effects of the adhesive layer on the multi-hit ballistic performance of ceramic/metal composite armors”, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 13, 2021, Pages 1496-1508.
- [50] Yalun Dong, Lihong Yang, Ziqi Jin, Linzhi Wu, “Experimental and numerical analysis of ballistic impact response of fiber-reinforced composite/metal composite target”, *Composite Structures*, Volume 294, 2022.
- [51] <https://www.youtube.com/watch?v=ULTbEndaG5k> (12.01.2022).
- [52] <https://defence24.pl/sily-zbrojne/gryf-z-lubawy-plate-carrier-dla-wojsk-obrony-terytorialnej> (12.01.2022).
- [53] <https://defence24.pl/mspo-maskpol-na-mspo-2021> (12.01.2022).
- [54] <https://www.spartanarmorsystems.com/> (12.01.2022).
- [55] <https://sharkballistic.eu/about/produkce/> (12.01.2022).
- [56] <https://monch.com/ebooks/military-technology/2019/06gh3d5ma/69/> (12.01.2022).
- [57] <https://cesarmour.co.uk/body-armour-plates.php> (12.01.2022).
- [58] <https://cft-precyzja.pl/dzial-br-z-laboratorium/> (12.01.2022).
- [59] https://en.wikipedia.org/wiki/Small_Arms_Protective_Insert (12.01.2022).
- [60] Walicki M., Janiszewski J, Cieplak K., Estimation of ballistic performance of armor steels based on the split Hopkinson shear bar data, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 2022;60(1):129–140.
- [61] Wu S-y, Sikdar P, Bhat GS, “Recent progress in developing ballistic and antiimpact materials: Nanotechnology and main approaches”, *Defence Technology* (2022), doi: <https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.06.007>.
- [62] Rodríguez-Uicab, O.; Avilés, F.; Gonzalez-Chi, P.I.; Canché-Escamilla, G.; Duarte-Aranda, S.; Yazdani-Pedram, M.; Toro, P.; Gamboa, F.; Mazo, M.A.; Nistal, A.; “Deposition of carbon nanotubes onto aramid fibers using as-received and chemically modified fibers. *Appl. Surf. Sci.* 2016, 385, 379–390, doi:10.1016/j.apsusc.2016.05.037.
- [63] Chen, J.; Zhu, Y.; Ni, Q.; Fu, Y.; Fu, X. Surface modification and characterization of aramid fibers with hybrid coating. *Appl. Surf. Sci.* 2014, 321, 103–108, doi:10.1016/j.apsusc.2014.09.196.
- [64] Xi, M.; Li, Y.L.; Shang, S. yong; Li, D.H.; Yin, Y.X.; Dai, X.Y. Surface modification of aramid fiber by air DBD plasma at atmospheric pressure with continuous on-line processing. *Surf. Coatings Technol.* 2008, 202, 6029–6033, doi:10.1016/j.surfcoat.2008.06.181.

-
- [65] Zhang, T.G.; Satapathy, S.S.; Vargas-Gonzalez, L.R.; Walsh, S.M. Ballistic impact response of Ultra-High-Molecular-Weight Polyethylene (UHMWPE). *Compos. Struct.* 2015, 133, 191–201, doi:10.1016/j.compstruct.2015.06.081
- [66] Bhatnagar, A. *Lightweight Ballistic Composites: Military and Law-Enforcement Applications: Second Edition*; 2016; ISBN 9780081004258.
- [67] Hu, D.; Zhang, Y.; Shen, Z.; Cai, Q. Investigation on the ballistic behavior of mosaic SiC/UHMWPE composite armor systems. *Ceram. Int.* 2017, 43, 10368–10376, doi:10.1016/j.ceramint.2017.05.071.
- [68] Dasgupta, K. Role of carbon nanotubes in the ballistic properties of boron carbide/carbon nanotube/ultrahigh molecular weight polyethylene composite armor. *Ceram. Int.* 2020, 46, 4137–4141, doi:10.1016/j.ceramint.2019.10.129.
- [69] Haque, B.Z.; Gillespie, J.W. Perforation mechanics of UHMWPE soft ballistic sub-laminate and soft ballistic armor pack: A finite element study. *J. Thermoplast. Compos. Mater.* 2021, doi:10.1177/08927057211042058.
- [70] Tanoglu, M.; Tugrul Seyhan, A. Investigating the effects of a polyester preforming binder on the mechanical and ballistic performance of E-glass fiber reinforced polyester composites. *Int. J. Adhes. Adhes.* 2003, doi:10.1016/S0143-7496(02)00061-1.
- [71] Reddy, P.R.S.; Reddy, T.S.; Mogulanna, K.; Srikanth, I.; Madhu, V.; Rao, K.V. Ballistic Impact Studies on Carbon and E-glass Fibre Based Hybrid Composite Laminates. In *Proceedings of the Procedia Engineering*; 2017.
- [72] Chocron, S.; Carpenter, A.J.; Scott, N.L.; Bigger, R.P.; Warren, K. Impact on carbon fiber composite: Ballistic tests, material tests, and computer simulations. *Int. J. Impact Eng.* 2019, doi:10.1016/j.ijimpeng.2019.05.002.
- [73] Turner, P.; Liu, T.; Zeng, X.; Brown, K. Three-dimensional woven carbon fibre polymer composite beams and plates under ballistic impact. *Compos. Struct.* 2018, doi:10.1016/j.compstruct.2017.10.091.
- [74] Muneer Ahmed, M.; Dhakal, H.N.; Zhang, Z.Y.; Barouni, A.; Zahari, R. Enhancement of impact toughness and damage behaviour of natural fibre reinforced composites and their hybrids through novel improvement techniques: A critical review. *Compos. Struct.* 2021, 259, 113496, doi:10.1016/j.compstruct.2020.113496.
- [75] Costa, U.O.; Nascimento, L.F.C.; Garcia, J.M.; Monteiro, S.N.; da Luz, F.S.; Pinheiro, W.A.; da Costa Garcia Filho, F. Effect of graphene oxide coating on natural fiber composite for multilayered ballistic armor. *Polymers (Basel)*. 2019, doi:10.3390/polym11081356.
- [76] Costa, U.O.; Nascimento, L.F.C.; Garcia, J.M.; Monteiro, S.N.; da Luz, F.S.; Pinheiro, W.A.; da Costa Garcia Filho, F. Effect of graphene oxide coating on natural fiber composite for multilayered ballistic armor. *Polymers (Basel)*. 2019, doi:10.3390/polym11081356.

-
- [77] Braga, F.D.O.; Luz, F.S. Da; Monteiro, S.N.; Lima, É.P. Effect of the impact geometry in the ballistic trauma absorption of a ceramic multilayered armor system. *J. Mater. Res. Technol.* 2018, 7, 554–560, doi:10.1016/j.jmrt.2018.06.019.
- [78] Abtew, 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.* 2019.
- [79] Crouch, Ian. “Body armour – New materials, new systems. Defence Technology.” (2019).
- [80] Szafran J., Matusiak A.; „ Polyurea coating systems: definition, research, applications.”; LIGHTWEIGHT STRUCTURES in CIVIL ENGINEERING, CONTEMPORARY PROBLEMS, Monograph from Scientific Seminar. 2016
- [81] ASTM D7136/D7136M-15; „Standard Test Method for Measuring the Damage Resistance of a Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite to a Drop-Weight Impact Event”
- [82] PN-EN ISO 9001:2015 – System zarządzania jakością
- [83] AQAP 2110:2016– „Wymagania NATO dotyczące zapewnienia jakości w projektowaniu, pracach rozwojowych i produkcji”
- [84] https://pl.wikipedia.org/wiki/Analiza_SWOT (3.03.2023)

Spis załączników

- Załącznik nr. 1 – Katalog firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.
- Załącznik nr. 2 – Raport z badań nr 002/04/2021
- Załącznik nr. 3 – Raport z badań nr 003/04/2021
- Załącznik nr. 4 – Raport z badań nr 002/05/2021
- Załącznik nr. 5 – Raport z badań nr 005/01/2022
- Załącznik nr. 6 – Raport z badań nr 006/01/2022
- Załącznik nr. 7 – Rysunki konstrukcyjne układu mocowania próbki



Nasza Firma



CFT Precyzja Sp. z o. o., założona w 2004 roku w Czosnowie k/Warszawy, jest wysokospecjalistycznym podmiotem, której działalność jest realizowana w zakresie dwóch jednostek wewnętrznych:



Dywizji **DEFENCE**, która specjalizuje się w opracowaniu, badaniu i wytwarzaniu innowacyjnych produktów o przeznaczeniu militarnym, obronnym i policyjnym (m.in. nowoczesne osłony balistyczne). Spółka rozwija nowatorskie technologie, kompleksowe systemy i rozwiązania w obrzazie ochrony środków transportu (pojazdów, statków powietrznych) oraz budynków i obiektów użyteczności publicznej. Oferowane produkty posiadają udokumentowane badania oraz certyfikacje krajowych i zagranicznych jednostek, jako spełniające polskie i międzynarodowe normy.



CFT Precyzja jest ponadto profesjonalnym centrum świadczącym usługi precyzyjnej obróbki metali o wysokim stopniu zaawansowania technologicznego w zakresie dywizji **METALWORKS**.

W ciągu blisko 20 lat swojej profesjonalnej działalności CFT Precyzja stała się docenianym, ważnym i wiarygodnym partnerem biznesowym podmiotów z następujących przemysłów: militarnego, wydobywczego, energetycznego, morskiego, przetwórczego i wielu innych, a jakość oferowanych produktów i usług zyskały uznanie na wielu kontynentach m.in. w Europie, Ameryce i Azji. Otwartość na oczekiwania klienta, elastyczność zespołu i szybkość przepływu informacji w połączeniu ze znakomitą parkiem maszynowym oraz silnym naciskiem na jakość i innowacyjność badawczo-rozwojową tworzą wyjątkową przewagę konkurencyjną i wartościowy alut w relacjach partnerskich.

POLITYKA JAKOŚCI



KON.NR
B - 050 / 2016



AQAP 2110
ISO 9001
WSK



ISO 14001
ISO 27001
ISO 45001

Laboratorium balistyczne



LABORATORIUM BALISTYCZNE
firmy CFT Precyzja Sp. z o.o.
(Certyfikat akredytacji laboratorium badawczego
nr. AB 1771 wg. PN-EN ISO/IEC 17025-2018 -02)



Realizacja testów balistycznych według norm krajowych i zagranicznych (STANAG, MIL, NIJ, VPAM) oraz badań według wymagań klienta.

- **Gwarantujemy bezstronność i niezależność laboratorium**
- Badamy pojazdy, kamizelki kuloodporne, hełmy, panele balistyczne (typu „add on armor” oraz „stand alone armor”), spill linery i inne...
- Dysponujemy kondycjonowanym **zamkniętym tunelem**
- Do badań wykorzystujemy innowacyjny system ostrzału próbek (do 8 ton) i celowania za pomocą sterowanej elektronicznie platformy jezdnej z możliwością podnoszenia i obrotu
- Oferujemy możliwości badań odtamkowych oraz pocisków do kalibru 14,5mm x 114mm (Poziom IV wg STANAG 4569)
- Zapewniamy nadzór, ocenę i **możliwość współpracy** w zakresie nowych materiałów o przeznaczeniu balistycznym
- Dysponujemy kamerą do **ujęć szybkozmiennych**, posiadamy możliwość kondycjonowania próbek od - 600C do + 1000C.

Nasz niezależny zespół profesjonalistów zapewnia obsługę oraz doradztwo w zakresie realizowanych badań. Obsługujemy klientów zagranicznych, krajowe instytucje oraz podmioty z branży militarnej oraz cywilnej. Zapraszamy również wszystkich zainteresowanych klientów cywilnych oraz z rynku reklamowego.

Świadczymy również usługi w zakresie projektowania, wykonawstwa oraz produkcji seryjnej osłon balistycznych (przede wszystkim kompozytowych), dysponujemy zapleczem działu badawczo-rozwojowego oraz własnym laboratorium, przez co możemy zapewnić współpracę na najwyższym poziomie jakości.



Produkcja wojskowa i obronna



OSŁONY BALISTYCZNE - CERTYFIKOWANE PRODUKTY

CFT Precyzja posiada w swoim portfolio wiele rozwiązań w zależności od wymagań klienta, zarówno pod kątem ekonomicznym, zoptymalizowanym lub o najwyższym stopniu zaawansowania technologicznego. W przypadku specyficznych wymagań w stosunku do parametrów masy powierzchniowej systemu i grubości prosimy o bezpośredni kontakt z działem **DEFENCE**.

Opancerzenia kompozytowe typu STAND ALONE

Produkt	Norma	Grubość (mm)	Waga (kg/m ²)
Ceriflexh	EN1063, EN1522/23 B7 (7,62x51 AP P80)	20	44
Ceriflexh 87* Ultra	EN1063, EN1522/23 B7 (7,62x51 AP P80)	20	38
Ceriflexh L1	STANAG 4569, Level I	32	34
Ceriflexh L2	STANAG 4569, Level II (7,62 x 39 AP BZ)	20	39
Ceriflexh L2 Structural	STANAG 4569, Level II (7,62 x 39 AP BZ)	20	62
Ceriflexh L3	STANAG 4569, Level III (7,62x51 APB WC)	28	68
Ceriflexh L3 UN	STANAG 4569, Level III (7,62x51 APB WC)	28	58
COMFITECH V13SA	VPAM APR, LEVEL 13 (12,7 x 99 AP)	35	98

Systemy typu SPALL LINER

Produkt	Norma	Grubość (mm)	Waga (kg/m ²)
Ceriflexh m2) Flex IIA)	NIJ 0108.01, level IIIa	10	9
Ceriflexh SIII FB4	NIJ 0108.01, level IIIa	10	11
Ceriflexh SIII VPAM 6	NIJ 0108.01, level III, VPAM level 6	16	16
Ceriflexh R10	EN1522/23, level FB2	5	5,5
Ceriflexh FB4/PE	EN1522/23, level FB4, VPAM level 4	4,5	4,2
Ceriflexh TSB40T / E40T	STANAG 2920, V50 > 760 m/s	9	9,5
Ceriflexh L10R / TB20T5	STANAG 2920, V50 > 550 m/s	6	6,5

*Odporność balistyczna sprawdzona / zapobiegająca również pociskom 7.62 x 39 BZ i 7.62 x 39 NORINCO

Opancerzenia kompozytowe typu ADD ON

Produkt	Norma	Grubość (mm)	Waga (kg/m ²)	Pancerz Bazowy
Ceriflexh 4L2 Ultra	STANAG 4569, Level II (7,62 x 39 AP BZ)	12	27	Armax 500, 4mm
Ceriflexh L2AL	STANAG 4569, Level II (7,62 x 39 AP BZ)	12	42	Aluminium 7-8mm
Ceriflexh 6L3 Ultra	STANAG 4569, Level III (7,62x51 APB WC)	16	45	Armax 500, 6mm
Ceriflexh 6L3 + Ceriflexh SIII VPAM 6	STANAG 4569, Level III (7,62x51 APB WC)	12- 16	54	Ceriflexh SIII VPAM 6
Ceriflexh 4V10	VPAM APR, lex. 10 A, (7,62 x 54 AP B32)	13	40	Armax 500, 4mm
Ceriflexh V13	VPAM APR, lex. 14, (12,7 x 99 AP)	25	89	Armax 500, 8mm
Ceriflexh 8L4 Ultra	STANAG 4569, Level 4 (14,5 x 114 AP B32)	25	74	Armax 500, 8mm
Ceriflexh LAAL	STANAG 4569, Level 4 (14,5 x 114 AP B32)	24	96	Aluminium 20mm

Produkcja wojskowa i obronna



OSŁONY BALISTYCZNE

Produkty projektowane i produkowane zgodnie z normami NATO STANAG 4569, EN1063, EN1522/23, VPAM oraz innymi wymaganiami klienta

Do zastosowań w wojskowych i policyjnych oraz cywilnych środkach transportu (tj. wozach opancerzonych, autach VIP, helikopterach, samolotach, łodziach i okrętach), w systemach ochrony budynków oraz ochrony personalnej.



Podstawowe atuty osłon balistycznych CFT: niezrównana wytrzymałość, wyjątkowo niska waga oraz atrakcyjne aspekty wizualne. Rozwiązania dostosowane do zadanych wymagań Zamawiającego lub wybranego profilu misji.

Dodatkowo produkty poprzez specyficzne powłoki i pokrycia naszych systemów, cechuje wysoka odporność na warunki **klimatyczne – eksploatacyjne**, jak również na **agresywne środki chemiczne**.



Kamizelki kuloodporne



PC-GUARD typu PLATE CARRIER



PC-GUARD typu PLATE CARRIER



PC-GUARD typu PLATE CARRIER

KAMIZELKI TAKTYCZNE CECHUJE:

- System szybkiego wypięcia poprzez zastosowanie klamr typu ROC
- Możliwość zastosowania dowolnej wielkości i kształtu wkładów insertów balistycznych typu STAND-ALONE (rekomendujemy nowy uniwersalny system NATO 250x 300mmn)
- Wytrzymały poprzez zastosowanie specjalnie laminowanych materiałów system MOLLE wycinany laserowo
- Uchwyt do ewakuacji rannego
- Szybki montaż/demontaż
- Zapewniający niepowtarzalny komfort ciepłoty COOL MAX system
- Konfiguracja w elementy dodatkowe (kieszenie na ekwipunek, na balistykę boczną, apteczki, plecak na suwaki inne) wg życzenia użytkownika

Zapewniamy kompleksowe rozwiązania do ochrony personalnej (kompletne kamizelki kuloodporne jak również same wkłady balistyczne). Proponujemy kompozytowe rozwiązania wkładów miękkich oraz twardych (SA - Stand Alone oraz ICW - In Conjunction With) spełniających wymagania norm w zakresie odtamniko - i kulo-odporności PN-V-87000, NIJ 0101.04, 0101.06 oraz w zakresie noża - i szpikulca - odporności NIJ 0115.00.



| Zabezpieczenia budynków



Projektowanie kompleksowych systemów uwzględniając przede wszystkim aspekty projektu takie jak sposoby zamocowań, ochrona na szczelin. Dzięki szerokiej bazie kwalifikowanych dostawców firma wykorzystuje również technologie powiązane takie jak: izolacja przeciw gazom bojowym, szczelność elektromagnetyczna, wyguszenia i inne. Możliwa adaptacja do istniejących budynków lub do warunków powstającego projektu.

Technologia zabezpieczania budynków oraz obiektów publicznych innowacyjnymi systemami opracowanymi przez CFT Precyzja. Możliwość zaprojektowania, zintegrowania i wyprodukowania rozwiązania wg. wymogów klienta w różnych klasach balistycznych oraz wybuchowych.



Rozwiązanie cechuje:

- Odporność balistyczna (EN1522/1523; EN1063; STANAG4569; UL752 oraz NIJ 0108.01)
- Wytrzymałość na Force Entry Test (PN-EN 1627 and ASTM F12333)
- Ochrona przed wybuchami
- Łatwa instalacja



I Kwadranty artyleryjskie



Unikalna w Polsce i na świecie, wyspecjalistyczna i profesjonalna usługa wytwarzania, regeneracji oraz kalibracji kwadrantów działowych, także pojedynczych egzemplarzy.

Kwadrant działowy M1 jest mechanicznym przyrządem pomiarowym. Służy do pomiaru kątów w płaszczyźnie pionowej (nachylenia lufy) oraz sprawdzania dokładności wskazań celownika dział. Wskalowany wg podziałki kątowej o wielkości 6400 w zakresie od 0 do 1600 mils NATO tj. od 0°-45° i od 45°-90°. Dokładność urządzenia wynosi +/-0.5milsa tj. 3.375'.



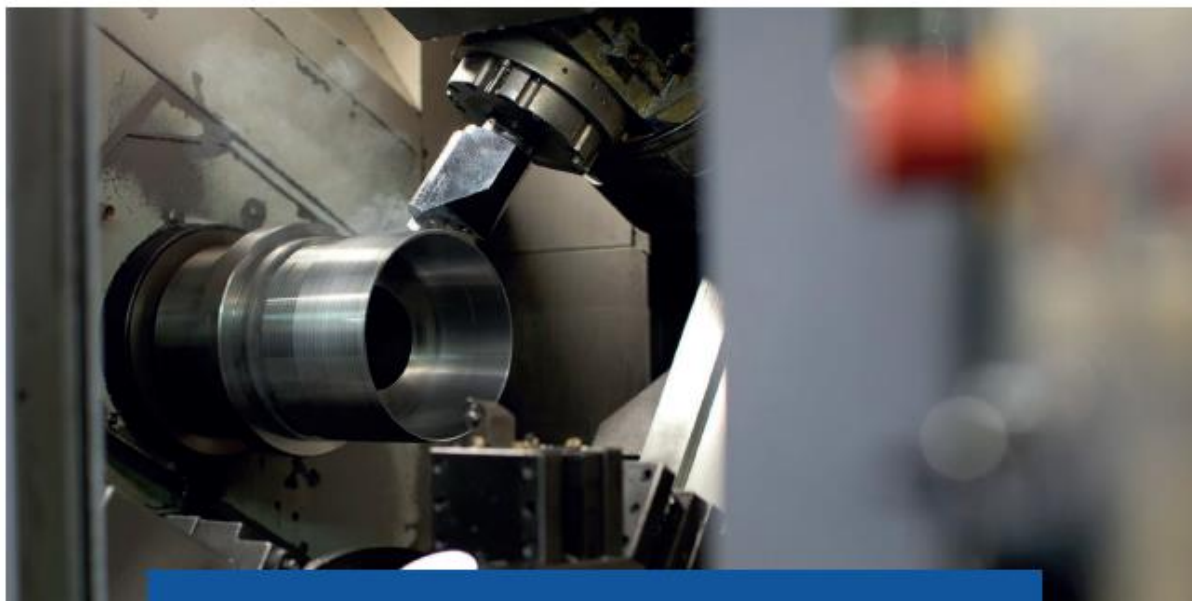
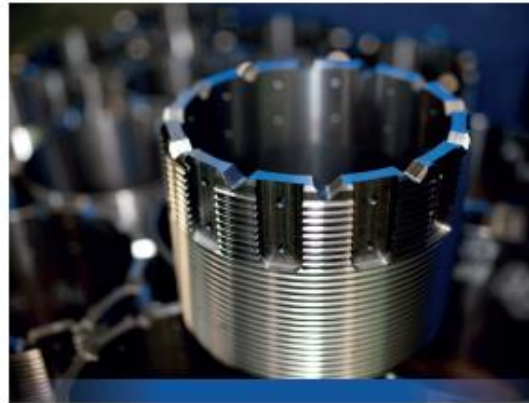
Kwadrant wykonany z metalu, techniką obróbki skrawaniem. Składa się z ramki, linijki i suwaka z poziomą. Ramka w kształcie nieregularnego pięciokąta z łukiem nazębnym wewnątrz. Stopki do ustawiania przyrządu na obsadzie lufy, ampulka w korpusie ustawienia poprzecznego wskazuje jego ustawienie pionowe.

| Usługi obróbki metali

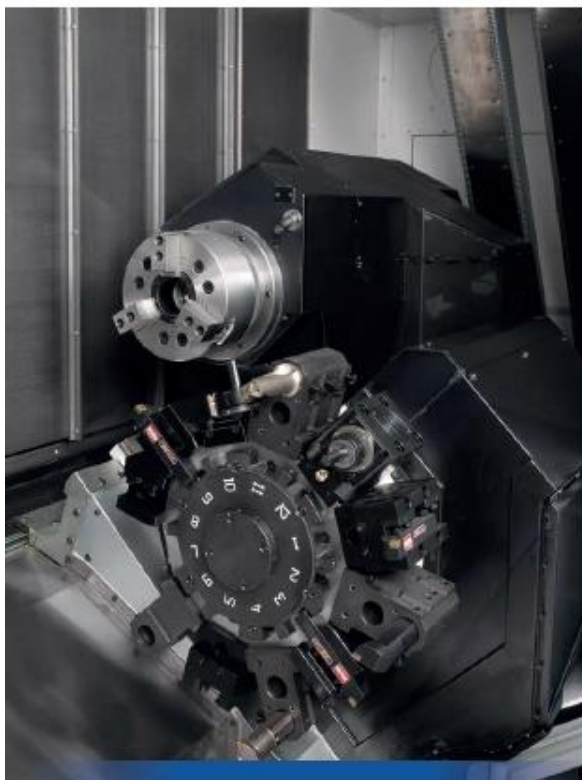


Precyzyjna obróbka mechaniczna metali o wysokim stopniu zaawansowania technologicznego (włącznie z obróbką powierzchniową, cieplną oraz cięciem precyzyjnym)

- **Frezowanie CNC**
- **Toczenie CNC**
- **Szlifowanie**
- **Cięcie wodą**
- **Elektrodrążenie EDM**
- **Spawanie**
- **Lakierowanie**
- **Prace ślusarskie**



| Usługi obróbki metali



Park maszynowy

Wycinarka wodna Techjet (**2000x3000, 4000bar**)

9 osiowe centrum tokarsko frezarskie Okuma (**Ø650x1500**)

9 osiowe centrum tokarsko frezarskie Mori-Seiki (**Ø500x1000**)

Centrum tokarsko frezarskie Voest-Alpine (**Ø450x2100**)

Centrum tokarsko frezarskie Hwacheon (**Ø590x2150**)

Centrum tokarsko frezarskie Okuma (**Ø300x500**)

Centrum tokarskie Takisawa (**Ø500x1000**)

Centrum tokarskie Hardinge (**Ø400x600**)

4 osiowe centrum frezarskie Okuma (**860x600x650**)

4 osiowe centrum frezarskie Okuma (**1000x600x650**)

4 osiowe centrum frezarskie Haas (**1100x600x550**)

4 osiowe centrum frezarskie Haas (**760x400x500**)

4 osiowe centrum frezarskie Wemas (**1000x600x600**)

Pionowe centrum frezarskie Wemas (**1000x600x600**)

Elektrodrążarka wgłębna CNC Eurospark (**500x300x200**)

Szlifierka płaska **1000x500**

Szlifierka wałków **Ø300x2100**

Maszyny konwencjonalne



| Usługi obróbki metali



Kontrola jakości

Dział kontroli jakości jest wyposażony w szereg precyzyjnych urządzeń pomiarowych, co pozwala nam sprawdzić nasze produkty pod względem dokładności wykonania.

Przykładamy ogromną wagę do wyposażenia laboratorium, dlatego wszystkie przyrządy oraz urządzenia pomiarowe regularnie poddajemy wzorcowaniu.



Wyposażenie laboratorium to m.in.:

- Maszyna pomiarowa CNC HEXAGON GLOBAL S + SKANER
- Maszyna pomiarowa CNC ABERLINK AXIOM
- Konturograf CNC GARANT CMI
- Twardościomierze
- Chropowościomierze
- Mikroskopy
- Gagemakery
- Sprawdziany
- Mikrometry, pasometry, średnicówki, suwniarki...






Dane kontaktowe:

CFT Precyzja Sp. z o.o.
ul. Polna 6
05-152 Czosnów

tel: +48 (22) 785 10 57

sekretariat@cft-precyzja.pl

	PRECYZJA	CFT Precyzja Sp. z o.o. Laboratorium Balistyczne Polna 6, 05-152 Czosnów Poland Office: +48 22 785 10 57 Fax: +48 22 785 10 19		
-----------------------------------------------------------------------------------	-----------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------

Data wydania: 21.04.2021 r.

TEST REPORT

(RAPORT Z BADAŃ)

Nr raportu 002/04/2021

Testing of the ballistic resistance of material.

(Badanie odporności balistycznej.)

Report number (<i>Nr raportu</i>)	: 002/04/2021
Date of delivery samples (<i>Data dostarczenia próbek</i>)	: 08.04.2021
Date of test (<i>Data Badań</i>)	: 15-16.04.2021
Tester (<i>Kierownik badań</i>)	: Kamil Zajac
Customer (<i>Zleceniodawca</i>)	: CFT Precyzja Sp. z o.o.
Samples (<i>Próbki</i>)	: P21/054 [REDACTED]
	Weight (<i>Masa</i>): 1240 g
	: P21/055 [REDACTED]
	Weight (<i>Masa</i>): 1372 g
	: P21/056 [REDACTED]
	Weight (<i>Masa</i>): 1274 g
	: P21/057 [REDACTED]
	Weight (<i>Masa</i>): 842 g
	: P21/058 [REDACTED]
	Weight (<i>Masa</i>): 1298 g
Manufacturer (<i>Producent</i>)	: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Test conditions (Warunki badań)

Required Test method (Wymagana metoda badania)	NIJ Standard-0101.06 (Modified)
Tested level of protection (Badany poziom odporności)	III (Modified)
Odstępstwa od normy (Deviations from the norm)	Ostrzał tylko prostopadły do próbki Pomiar ugięć dla 1, 2 i 3 strzału po 3 strzale w próbce Ilość próbek wg wymagań klienta
Wyposażenie badawcze i jego dane techniczne	
Calibre (Kaliber)	7,62x51 mm
Bullet type (Rodzaj pocisku)	FMJ
Bullet mass (Masa pocisku)	9,6 g
Bullet velocity (Prędkość pocisku)	847 m/s \pm 9,1 m/s
Velocity measurement (Pomiar prędkości)	2,5 m przed próbka
Weapon (Lufa)	Test barriell SN. 6244
Barriell length (Długość lufy)	650 mm
Shooting distance (Dystans ostrzału)	15 m
Room temperature (Temp otoczenia)	19,9°C (15.04.2021), 19,8°C (16.04.2021)
Humidity (Wilgotność)	32% (15.04.2021), 35% (16.04.2021)
Conditioning (Kondycjonowanie)	wilgotność: 50% \pm 20%; temperatura: 21°C \pm 2.9°C
Sample condition (stan próbek)	Brak uwag
Penetration witness (Świadek)	Plastilina ROMA No.1
Deflection limit after shots (Dopuszczalne ugięcie po ostrzale)	44 mm
Hit pattern (preset) (Szablon ostrzału)	Zgodnie z wymaganiami klienta

1 Introduction

CFT Precyzja Sp. z o.o. provided five armor samples for testing on 15 April – 16 April 2021. This is a two part report. Section 2 is the ballistic resistance test report.

2 Ballistic Resistance Test

Five samples were used for ballistic resistance testing. The samples were conditioned for 24h hours: humidity: 50 % ± 20 %; temperature: 21 °C ± 2.9 °C.

2.1 Threats and Instrumentation

2.1.1 Threats*

- 7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (147 gr) projectiles (M80)

* The projectiles were fired from a universal receiver which was fitted with the appropriate barrel and mounted on a CFT Precyzja Testing mount.

2.1.2 Instrumentation

Projectile velocity measurements were obtained using Prototypa light gate. A digital caliper was used to measure the post-impact deformations observed in the backing material for selected shots of each sample. A digital still camera was used to document the test. Photographs are presented under each report.

2.2 Details of Test

The objective of this test was to conduct a ballistic resistance test on the samples in accordance with NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified) and the customer's request. Shot spacing between multiple impacts on a single sample was in accordance the referenced performance standard. Shots against the samples were performed at 0.0° obliquity.

For each shot, the target was strapped to a 5.5-in plastilina-clay/plywood backing and clamped to a rigid test fixture. All firings were conducted at 15.0 m from the target. The projectile velocities used for the test were in accordance with the referenced performance standard.

2.3 Customer request

Customer request Ballistic Resistance Test:

3 shots per sample.

Plastilina deformation was measured after 3rd shoot.

2.4 Summary of Results

The results of the ballistic resistance test are shown in Table 1. The round-by-round data sheets for all testing performed are provided on the following page.

Table 1. Summary of Ballistic Resistance Test Results

Sample No.	Sample	Size (mm)	Weight (g)	Threat	Test Date	Target Obliq. (°)	Shot No.	Penetration Data				Plastilina Pre-/ Post-test drop	
								Velocity (m/s)	Fair	Results	Def. (mm)		
P21/054	[REDACTED]	250 x 300	1240	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	15.04.2021	0.0	1	854,9	854,8	Yes	None	59,8	+/-
							2	857,8	857,9	No	None	49,8	
							3	850,0	850,0	Yes	None	50,7	
P21/055	[REDACTED]	250 x 300	1372	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	15.04.2021	0.0	1	860,8	860,8	No	Perforation	+/-	
							2	864,5	864,5	No	None		44,1
							3	859,4	859,5	No	Perforation		
P21/056	[REDACTED]	250 x 300	1274	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	16.04.2021	0.0	1	835,8	835,7	No	None	64,0	+/-
							2	857,0	857,0	No	None	53,1	
							3	848,0	848,0	Yes	None	61,5	
P21/057	[REDACTED]	250 x 300	842	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	16.04.2021	0.0	1	877,9	877,9	No	Perforation	+/-	
							2	857,8	857,7	No	Perforation		
							3	-	-	-	-		-
P21/058	[REDACTED]	250 x 300	1298	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	16.04.2021	0.0	1	849,5	849,5	Yes	None	39,5	+/-
							2	850,9	850,8	Yes	None	56,8	
							3	846,5	846,6	Yes	None	48,9	

Red colour of deflection means that depth is above limit 44 mm.
 * Due to the plastilina test not being carried out, the results may be inaccurate

BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Job No.: N0310

Test Date: 15.04.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/054

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 19.8-20.7

Weight (g): 1240
Plies/Laminates: 76w

Date Received: 08.04.2021

Via: Client

Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III

Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.9°C
BP: 1004 hPa
RH: 32%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile

Bullet Weight

Weapon

7.62 mm NATO FMJ (M80)

147grs / 9.6g

Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)

(2) Customer request

	Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
Pre-Test Drop Calibration Time: 10:38 Temp: 45,5°C	21.7	18.2	20.0	20.7	19.5	20.0
Post-Test Drop Calibration Time: 11:02 Temp: 41,2°C	17.5	17.4	18.2	17.6	18.7	17.9

Shot No.	Vel. (m/s)	Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	854.9	854.8	Yes	None	59.8	0.0
2	857.8	857.9	No	None	49.8	0.0
3	850.0	850.0	Yes	None	50.7	0.0

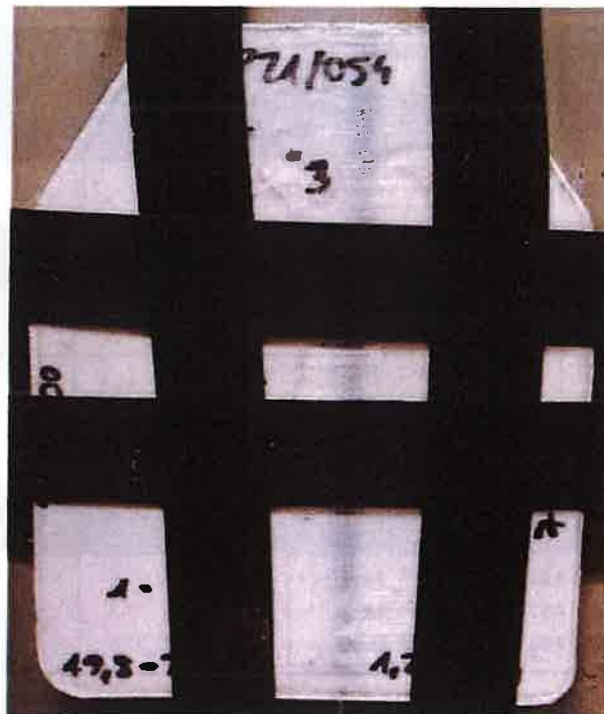
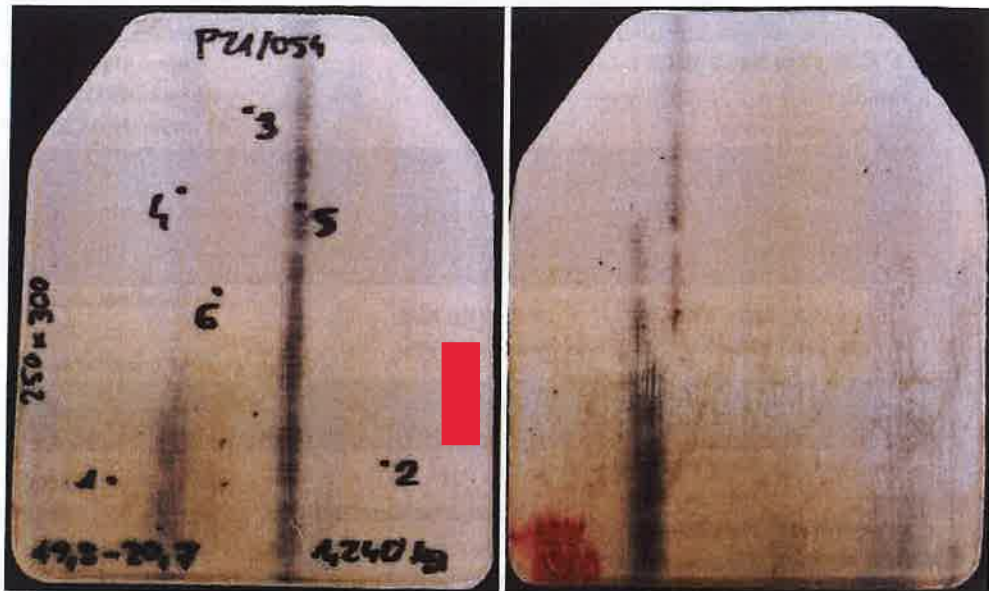
Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

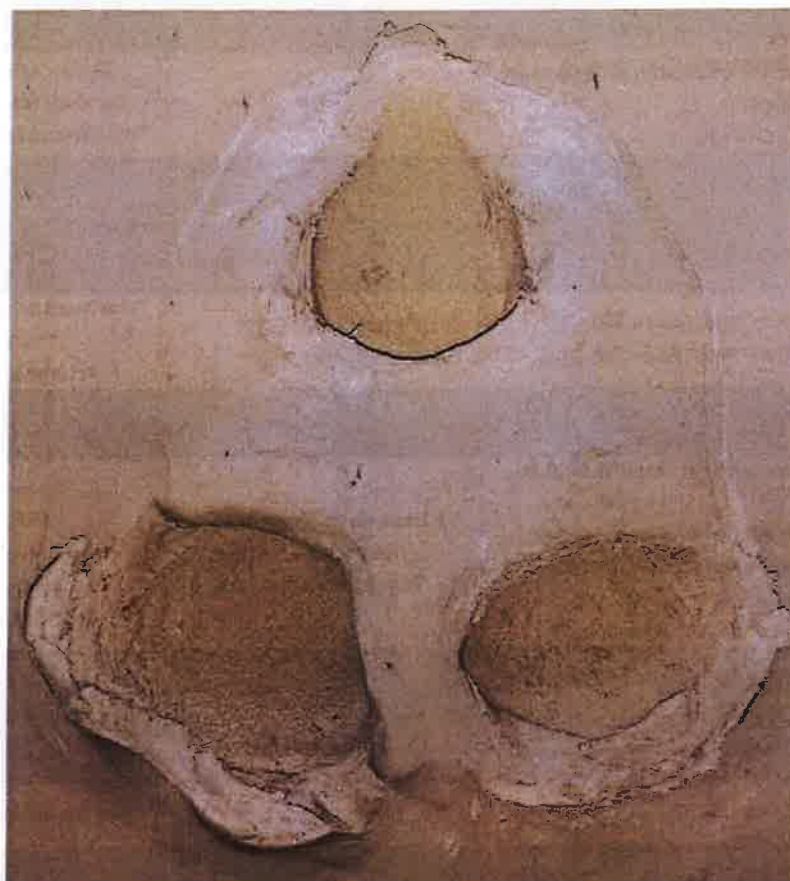
Footnotes:

Deflection exceeded for 1, 2, 3 shot

Before test – P21/054



After test – P21/054



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Job No.: N0310

Test Date: 15.04.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/055

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 20.5-20.8

Weight (g): 1372
Plies/Laminates: 76w

Date Received: 08.04.2021
Via: Client
Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.9°C
BP: 1004 hPa
RH: 32%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
(2) Customer request								
Pre-Test Drop Calibration	Time: 14:48 Temp: 44,2°C	Depth of Indent (mm):	20.4	18.1	21.0	19.7	20.4	19.9
Post-Test Drop Calibration	Time: 15:18 Temp: 39,0°C	Depth of Indent (mm):	16.3	17.1	18.6	16.3	18.1	17.3

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	860.8	860.8	No	Perforation	-	0.0	oversize velocity
2	864.5	864.5	No	None	44.1	0.0	oversize velocity
3	859.4	859.5	No	Perforation	-	0.0	oversize velocity

Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

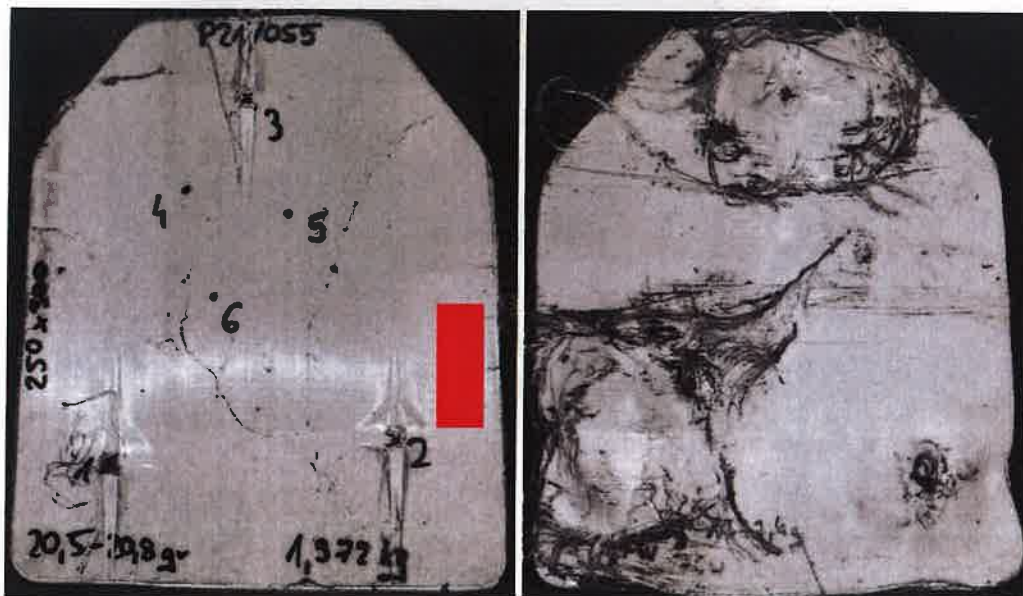
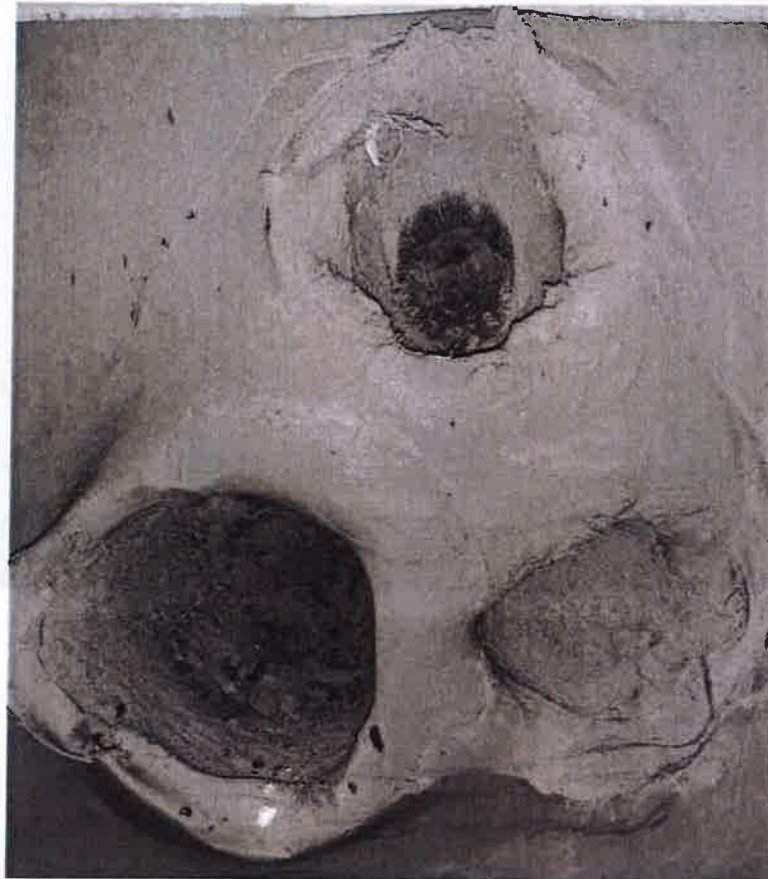
Footnotes:

Deflection exceeded for 2 shot. Perforation for 1, 3 shot.

Before test – P21/055



After test – P21/055



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o. ul. Polna 6, 05-152 Czosnów	Client: CFT Precyzja Sp. z o.o. Job No.: N0310 Test Date: 16.04.2021
------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------

Test Panel	Description: XXXXXXXXXX
-------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

Manufacturer: Client	Sample No.: P21/056
----------------------	---------------------

Size (mm): 250 x 300 Thickness: 19.3-19.6	Weight (g): 1274 Plies/Laminates: 80w	Date Received: 08.04.2021 Via: Client Returned: Client
----------------------------------------------	------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06 Level III Witness Panel: Plastilina-clay Backing Material: 5.5-in Plastilina ROMA No.1 /plywood Condition: Ambient	Vel. Location to Target (m): 2 Range to Target (m): 15 Target to Witness (m): 0	Temp: 19.8°C BP: 1017 hPa RH: 35% Gunner: Zając Kamil Recorder: Konieczny Piotr
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

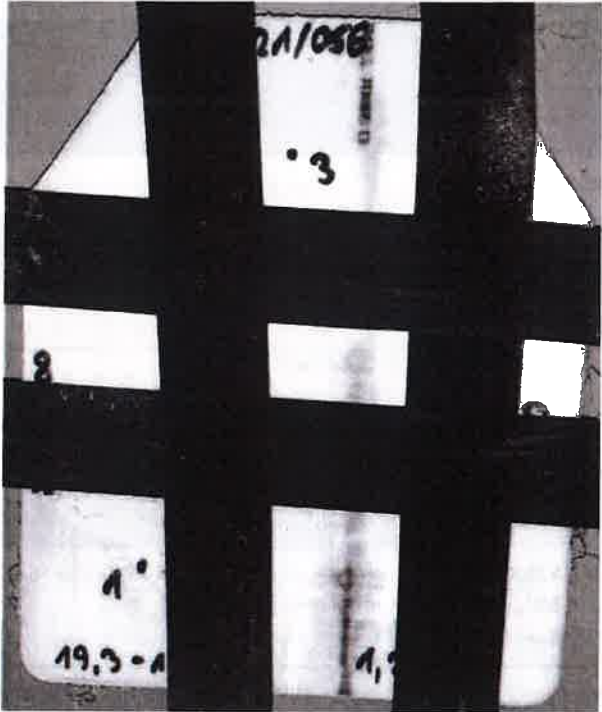
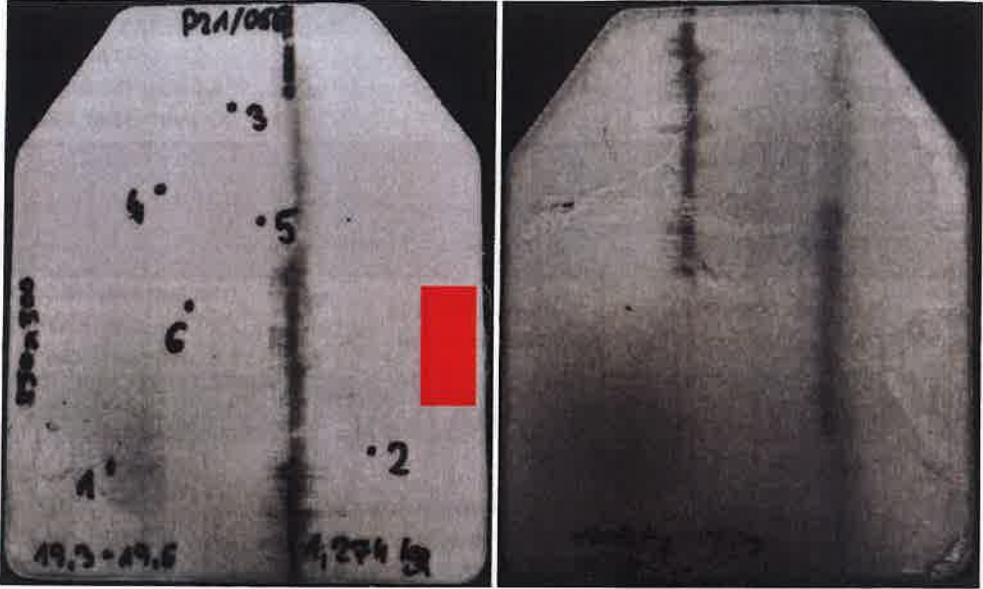
(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
(2) Customer request								
Pre-Test Drop Calibration	Time: 08:12 Temp: bd	Depth of Indent (mm):	20.1	20.9	19.9	20.9	19.7	20.3
Post-Test Drop Calibration	Time: 08:34 Temp: bd	Depth of Indent (mm):	19.0	16.6	16.0	17.5	17.9	17.4

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	835.8	835.7	No	None	64.0	0.0	lower velocity
2	857.0	857.0	No	None	53.1	0.0	oversize velocity
3	848.0	848.0	Yes	None	61.5	0.0	

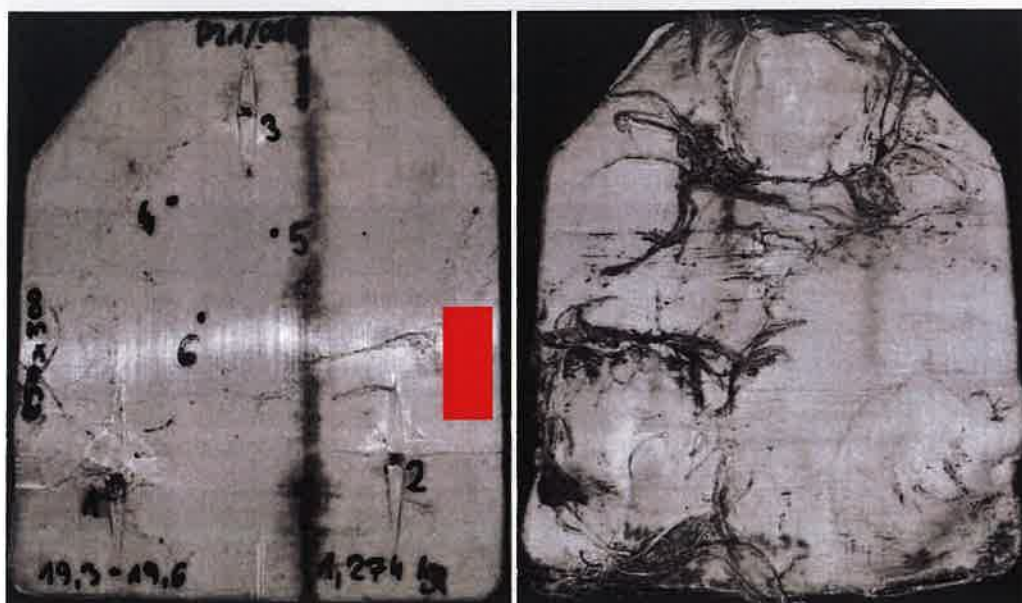
Remarks:
Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

Footnotes:
Deflection exceeded for 1, 2, 3 shot

Before test – P21/056



After test – P21/056



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Job No.: N0310

Test Date: 16.04.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/057

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 13.5-13.9

Weight (g): 842
Plies/Laminates: 94w

Date Received: 08.04.2021

Via: Client

Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.8°C
BP: 1017 hPa
RH: 35%
Gunner: Zajęc Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)

(2) Customer request

			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
Pre-Test Drop Calibration	Time: 11:00 Temp: 43,4°C	Depth of Indent (mm):	22,0	20,0	20,5	21,2	19,1	20,6
Post-Test Drop Calibration	Time: bd Temp: bd	Depth of Indent (mm):	14,8	16,7	17,2	16,7	16,0	16,3

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	877.9	877.9	No	None	Perforation	0.0	oversize velocity
2	857.8	857.7	No	None	Perforation	0.0	oversize velocity
3	-	-	-	-	-	-	-

Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

Footnotes:

Perforation for 1, 2 shot.

Plastilina deflection limit in post-test drop exceeded

Before test – P21/057



After test – P21/057



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o. ul. Polna 6, 05-152 Czosnów	Client: CFT Precyzja Sp. z o.o. Job No.: N0310 Test Date: 16.04.2021
------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------

Test Panel	Description: XXXXXXXXXX
-------------------	-----------------------------------------------------------------------------------

Manufacturer: Client	Sample No.: P21/058
----------------------	---------------------

Size (mm): 250 x 300 Thickness: 19.3-19.8	Weight (g): 1298 Plies/Laminates: 126w	Date Received: 08.04.2021 Via: Client Returned: Client
----------------------------------------------	-------------------------------------------	--------------------------------------------------------------

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06 Level III Witness Panel: Plastilina-clay Backing Material: 5.5-in Plastilina ROMA No.1 /plywood Condition: Ambient	Vel. Location to Target (m): 2 Range to Target (m): 15 Target to Witness (m): 0	Temp: 19.8°C BP: 1017 hPa RH: 35% Gunner: Zając Kamil Recorder: Konieczny Piotr
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

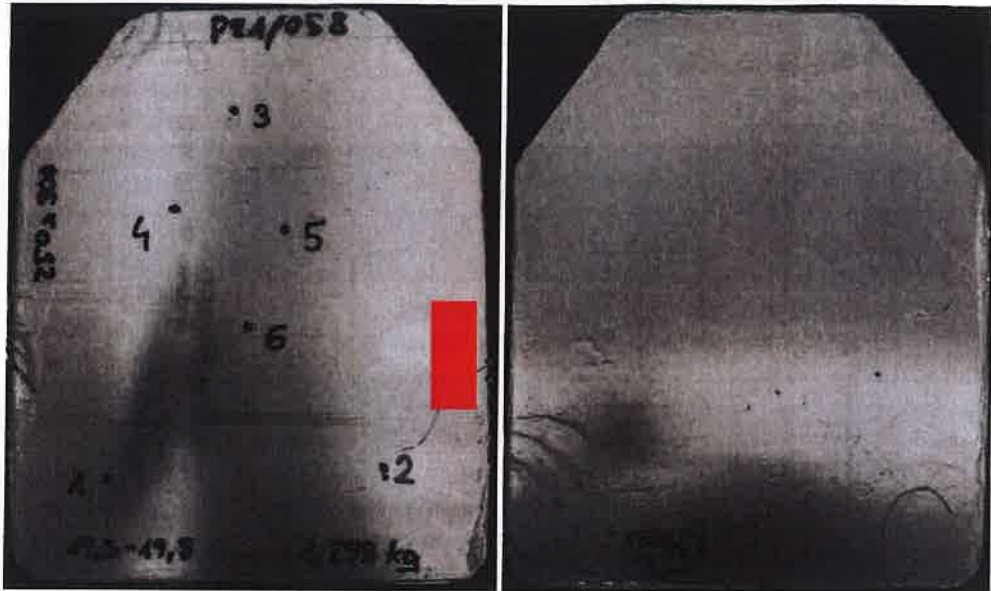
(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
(2) Customer request								
Pre-Test Drop Calibration	Time: 13:00 Temp: bd	Depth of Indent (mm):	20,0	20,2	18,3	18,7	19,8	19,4
Post-Test Drop Calibration	Time: 13:20 Temp: bd	Depth of Indent (mm):	17,5	16,9	16,9	16,9	17,3	17,1

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	849.5	849.5	Yes	None	39.5	0.0	
2	850.9	850.8	Yes	None	56.8	0.0	
3	846.5	846.6	Yes	None	48.9	0.0	

Remarks:
 Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

Footnotes:
 Deflection exceeded for 2, 3 shot.

Before test – P21/058



After test – P21/058



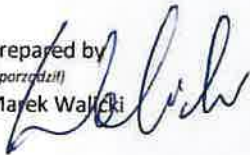
Niepewność pomiaru nie przekracza odpowiednio:

- Prędkość pocisków $\pm 0,3\%$
- Dokładność masy $\pm 0,002\text{kg}$
- Dokładność kąta ostrzału $\pm 2\%$
- Dokładność pomiaru temperatury $\pm 0,2^\circ\text{C}$
- Dokładność pomiaru wilgotności $\pm 2\%$

Powyższe wyniki badań odnoszą się wyłącznie do badanej próbki.

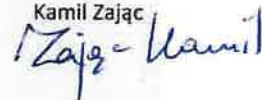
Bez pisemnej zgody laboratorium badawczego raport nie może być powielany inaczej, jak tylko w całości.

Prepared by
(Sprawdził)
Marek Walicki



Approved by
(Zatwierdził)

Kamil Zając





Data wydania: 26.04.2021 r.

TEST REPORT

(RAPORT Z BADAŃ)

Nr raportu 003/04/2021

Testing of the ballistic resistance of material.

(Badanie odporności balistycznej.)

Report number (Nr raportu)	: 003/04/2021
Date of delivery samples (Data dostarczenia próbek)	: 08.04.2021
Date of test (Data Badań)	: 21.04.2021
Tester (Kierownik badań)	: Kamil Zajęc
Customer (Zleceniodawca)	: CFT Precyzja Sp. z o.o.
Samples (Próbki)	: P21/054 [REDACTED] Weight (Masa): 1240 g
	: P21/055 [REDACTED] Weight (Masa): 1372 g
	: P21/056 [REDACTED] Weight (Masa): 1274 g
	: P21/057 [REDACTED] Weight (Masa): 842 g
	: P21/058 [REDACTED] Weight (Masa): 1298 g
Manufacturer (Producent)	: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Test conditions (*Warunki badań*)

Required Test method (<i>Wymagana metoda badania</i>)	PN-V-87000:2011 (Modified)
Tested level of protection (<i>Badany poziom odporności</i>)	K3 C (Modified)
Odstępstwa od normy (<i>Deviations from the norm</i>)	Pojedynczy ostrzał prostopadły do próbki Pomiar ugięć dla 1 strzału Ilość próbek wg wymagań klienta
Wyposażenie badawcze i jego dane techniczne	
Calibre (<i>Kaliber</i>)	7,62x51 mm
Bullet type (<i>Rodzaj pocisku</i>)	FMJ
Bullet mass (<i>Masa pocisku</i>)	9,6 g
Bullet velocity (<i>Prędkość pocisku</i>)	840 m/s ± 15 m/s
Velocity measurement (<i>Pomiar prędkości</i>)	2,5 m przed próbką
Weapon (<i>Lufa</i>)	Test barrel SN. 6244
Barrel length (<i>Długość lufy</i>)	650 mm
Shooting distance (<i>Dystans ostrzału</i>)	15 m
Room temperature (<i>Temp otoczenia</i>)	19,1°C
Humidity (<i>Wilgotność</i>)	43%
Conditioning (<i>Kondycjonowanie</i>)	wilgotność: 50% ± 20%; temperatura: 21°C ± 2.9°C
Sample condition (stan próbek)	Próbki po ostrzale wg normy NIJ Standard– 0101.06 Lv III (Modified)
Penetration witness (<i>Świadek</i>)	Plastilina
Deflection limit after shots (<i>Dopuszczalne ugięcie po ostrzale</i>)	40 mm
Hit pattern (preset) (<i>Szablon ostrzału</i>)	Zgodnie z wymaganiami klienta

Backing Material Test (*Badanie podłoża balistycznego*)

Przeprowadzono badania podłoża balistycznego przed testami i po testach. Wartość dopuszczalna ugięcia plasteliny to 25 ± 3 mm. Wyniki z badań zamieszczono poniżej.

Lp.	Pomiar 1 [mm]	Pomiar 2 [mm]	Pomiar 3 [mm]	Średnia [mm]	Uwaga
1	25,3	26,4	25,7	25,8	Przed 1 próbka
2	24,4	23,0	23,0	23,5	Po 5 próbce

Test results 1 (Wyniki badań 1)

2021-04-21_P21_054

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

Kąt ostrzału: 90° = 0° NATO

P21/054			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	850,1	850,1	28,9

Legend

(+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation
(-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration
(S) splinters allowed designation
(B) bulge back surface of an armour
(C) crack
(Fv+) Fair – faster impact velocity
(UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity

Legenda:

(+) Częściowa penetracja (PP), bez penetracji / bez oznaczonych odłamków na świadku
(-) Pełna penetracja (CP), pełna penetracja świadka
(S) wykazane ślady odłamków na świadku bez penetracji
(B) wybrzuszenie tylnej części pancerza
(C) pęknięcie
(Fv+) Prawidłowy – większa prędkość uderzenia
(UFv+ / UFv-) Nieprawidłowy – większa / mniejsza prędkość uderzenia

Comments (Uwagi):

Strzał nr 1 z większą prędkością uderzenia (klasyfikowany jako prawidłowy). Wartość ugięcia poniżej dopuszczalnej wartości 40 mm.

Wartości liczbowe w kolumnie „Notatki” odnoszą się do pomiaru wgniecenia podłoża balistycznego i są wyrażone w [mm].

Before test – P21/054



After test – P21/054



Test results 2 (Wyniki badań 2)

2021-04-21_P21_055

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

Kąt ostrzału: 90° = 0° NATO

P21/055			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	829,4	829,4	31,2

Legend

(+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation
(-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration
(S) splinters allowed designation
(B) bulge back surface of an armour
(C) crack
(Fv+) Fair – faster impact velocity
(UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity

Legenda:

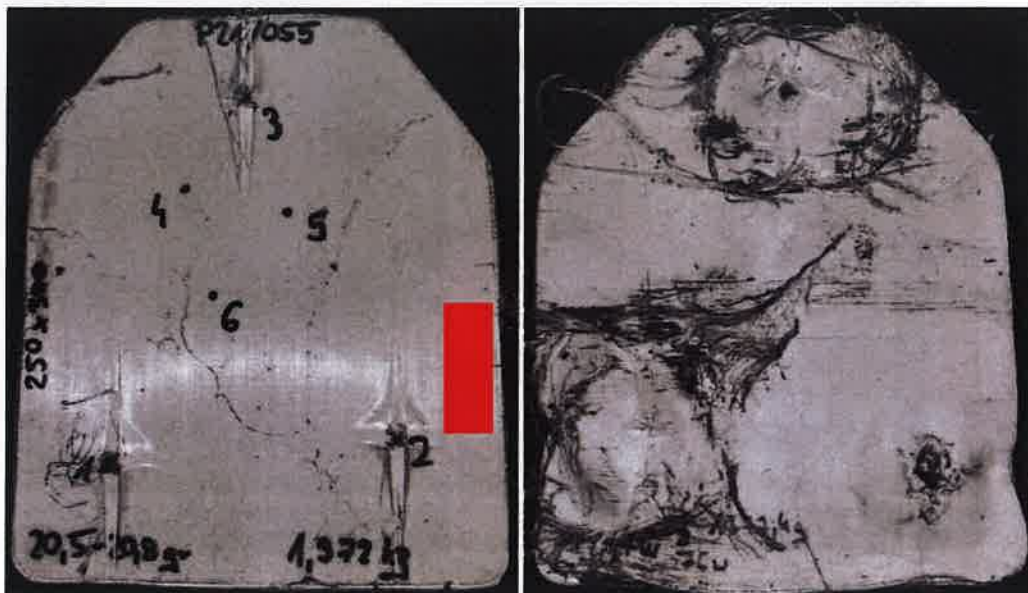
(+) Częściowa penetracja (PP), bez penetracji / bez oznaczonych odłamków na świadku
(-) Pełna penetracja (CP), pełna penetracja świadka
(S) wykazane ślady odłamków na świadku bez penetracji
(B) wybrzuszenie tylnej części pancerza
(C) pęknięcie
(Fv+) Prawidłowy – większa prędkość uderzenia
(UFv+ / UFv-) Nieprawidłowy – większa / mniejsza prędkość uderzenia

Comments (Uwagi):

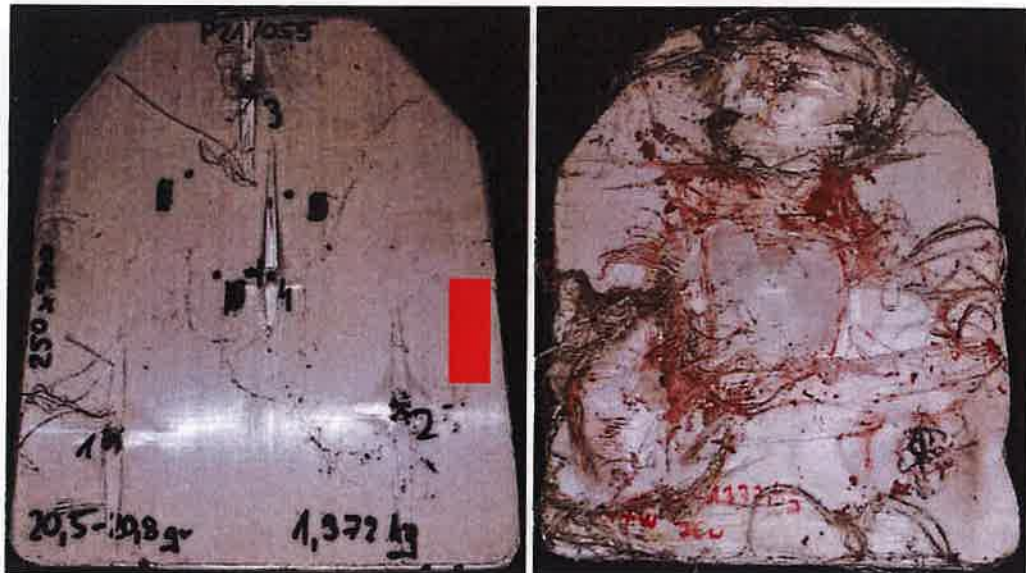
Strzał nr 1 z normową prędkością uderzenia. Wartość ugięcia poniżej dopuszczalnej wartości 40 mm.

Wartości liczbowe w kolumnie „Notatki” odnoszą się do pomiaru wgniecenia podłoża balistycznego i są wyrażone w [mm].

Before test – P21/055



After test – P21/055



Test results 3 (Wyniki badań 3)

2021-04-21_P21_056

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

Kąt ostrzału: 90° = 0° NATO

P21/056			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	847,2	847,2	33,5

Legend

(+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation
(-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration
(S) splinters allowed designation
(B) bulge back surface of an armour
(C) crack
(Fv+) Fair – faster impact velocity
(UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity

Legenda:

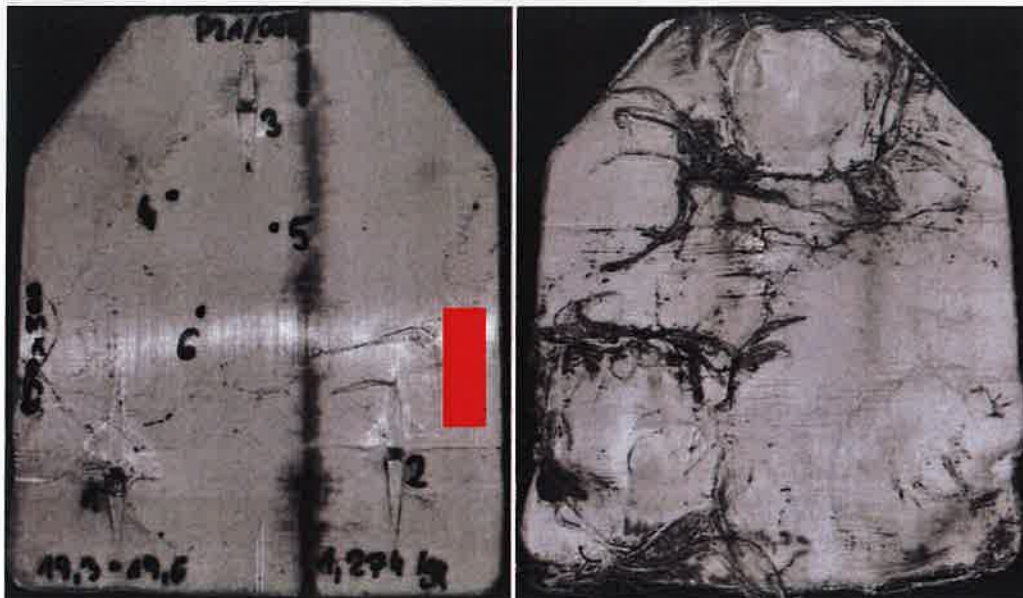
(+) Częściowa penetracja (PP), bez penetracji / bez oznaczonych odłamków na świadku
(-) Pełna penetracja (CP), pełna penetracja świadka
(S) wykazane ślady odłamków na świadku bez penetracji
(B) wybrzuszenie tylnej części pancerza
(C) pęknięcie
(Fv+) Prawidłowy – większa prędkość uderzenia
(UFv+ / UFv-) Nieprawidłowy – większa / mniejsza prędkość uderzenia

Comments (Uwagi):

Strzał nr 1 z normową prędkością uderzenia. Wartość ugięcia poniżej dopuszczalnej wartości 40 mm.

Wartości liczbowe w kolumnie „Notatki” odnoszą się do pomiaru wgniecenia podłoża balistycznego i są wyrażone w [mm].

Before test – P21/056



After test – P21/056



Test results 4 (Wyniki badań 4)

2021-04-21_P21_057

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

Kąt ostrzału: 90° = 0° NATO

P21/057			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	838,5	838,5	-

Legend

(+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation

(-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration

(S) splinters allowed designation

(B) bulge back surface of an armour

(C) crack

(Fv+) Fair – faster impact velocity

(UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity

Legenda:

(+) Częściowa penetracja (PP), bez penetracji / bez oznaczonych odłamków na świadku

(-) Pełna penetracja (CP), pełna penetracja świadka

(S) wykazane ślady odłamków na świadku bez penetracji

(B) wybrzuszenie tylnej części pancerza

(C) pęknięcie

(Fv+) Prawidłowy – większa prędkość uderzenia

(UFv+ / UFv-) Nieprawidłowy – większa / mniejsza prędkość uderzenia

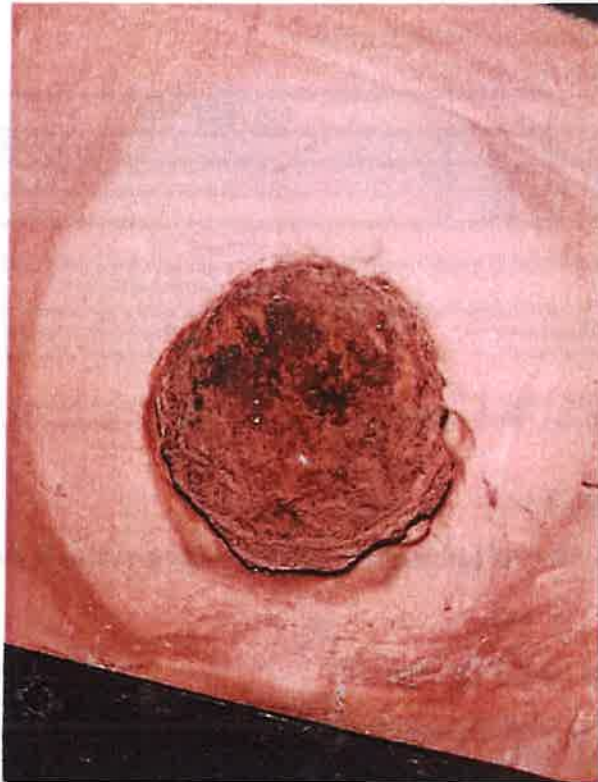
Comments (Uwagi):

Strzał nr 1 z normową prędkością uderzenia. Dla tego strzału wystąpiło przebicie próbki.

Before test – P21/057



After test – P21/057



Test results 5 (Wyniki badań 5)

2021-04-21_P21_058

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

Kąt ostrzału: 90° = 0° NATO

P21/058			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	857,6	857,5	29,3

Legend

(+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation

(-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration

(S) splinters allowed designation

(B) bulge back surface of an armour

(C) crack

(Fv+) Fair – faster impact velocity

(UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity

Legenda:

(+) Częściowa penetracja (PP), bez penetracji / bez oznaczonych odłamków na świadku

(-) Pełna penetracja (CP), pełna penetracja świadka

(S) wykazane ślady odłamków na świadku bez penetracji

(B) wybrzuszenie tylnej części pancernia

(C) pęknięcie

(Fv+) Prawidłowy – większa prędkość uderzenia

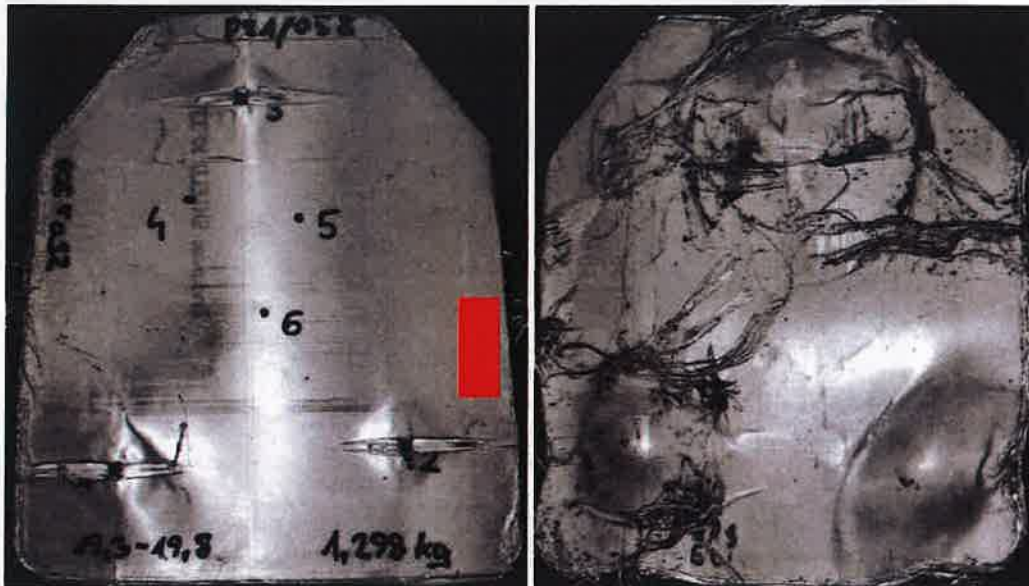
(UFv+ / UFv-) Nieprawidłowy – większa / mniejsza prędkość uderzenia

Comments (Uwagi):

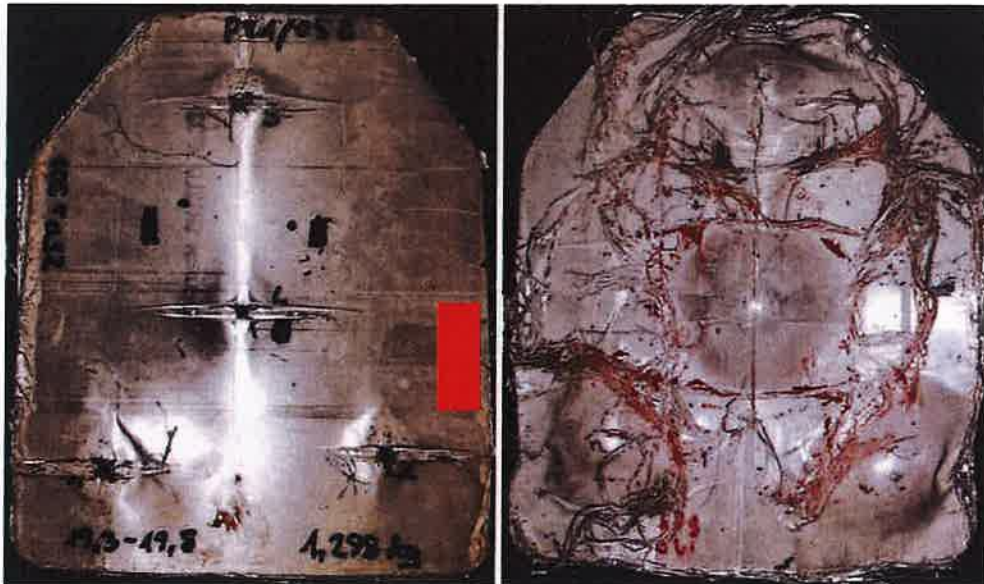
Strzał nr 1 z większą prędkością uderzenia (klasyfikowany jako prawidłowy). Wartość ugięcia poniżej dopuszczalnej wartości 40 mm.

Wartości liczbowe w kolumnie „Notatki” odnoszą się do pomiaru wgniecenia podłoża balistycznego i są wyrażone w [mm].

Before test – P21/058



After test – P21/058



Niepewność pomiaru nie przekracza odpowiednio:

- Prędkość pocisków $\pm 0,3\%$
- Dokładność masy $\pm 0,002\text{kg}$
- Dokładność kąta ostrzału $\pm 2\%$
- Dokładność pomiaru temperatury $\pm 0,2^\circ\text{C}$
- Dokładność pomiaru wilgotności $\pm 2\%$

Powyższe wyniki badań odnoszą się wyłącznie do badanej próbki.

Bez pisemnej zgody laboratorium badawczego raport nie może być powielany inaczej, jak tylko w całości.

Prepared by

(Sprzyjał)

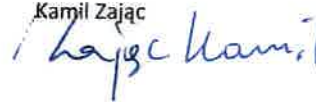
Marek Wałicki

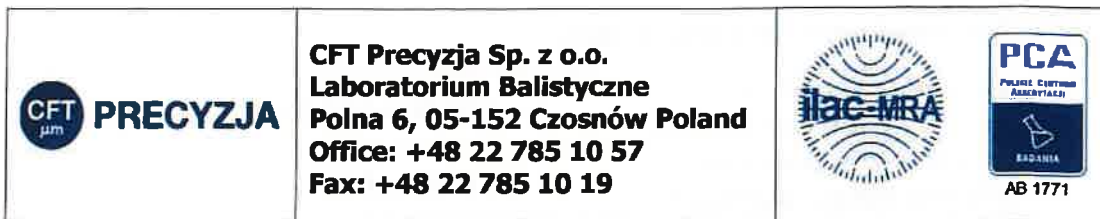


Approved by

(Zatwierdził)

Kamil Zając





Data wydania: 20.05.2021 r.

TEST REPORT

(RAPORT Z BADAŃ)

Nr raportu 002/05/2021

Testing of the ballistic resistance of material.

(Badanie odporności balistycznej.)

Report number (<i>Nr raportu</i>)	: 002/05/2021
Date of delivery samples (<i>Data dostarczenia próbek</i>)	: 10.05.2021
Date of test (<i>Data Badań</i>)	: 12-13.05.2021
Tester (<i>Kierownik badań</i>)	: Kamil Zajac
Customer (<i>Zleceniodawca</i>)	: CFT Precyzja Sp. z o.o.
Samples (<i>Próbki</i>)	: P21/049 [REDACTED] Weight (<i>Masa</i>): 1380 g
	: P21/050 [REDACTED] Weight (<i>Masa</i>): 1382 g
	: P21/051 [REDACTED] Weight (<i>Masa</i>): 1478 g
	: P21/052 [REDACTED] Weight (<i>Masa</i>): 982 g
	: P21/053 [REDACTED] Weight (<i>Masa</i>): 1448 g
Manufacturer (<i>Producent</i>)	: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Test conditions (Warunki badań)

Required Test method (Wymagana metoda badania)	NIJ Standard-0101.06 (Modified)
Tested level of protection (Badany poziom odporności)	III (Modified)
Odstępstwa od normy (Deviations from the norm)	Ostrzał tylko prostopadły do próbki Pomiar ugięć po 1, 2 i 3 strzale w próbkę Ilość próbek wg wymagań klienta
Wyposażenie badawcze i jego dane techniczne	
Calibre (Kaliber)	7,62x51 mm
Bullet type (Rodzaj pocisku)	FMJ
Bullet mass (Masa pocisku)	9,6 g
Bullet velocity (Prędkość pocisku)	847 m/s \pm 9,1 m/s
Velocity measurement (Pomiar prędkości)	2,5 m przed próbką
Weapon (Lufa)	Test barrel SN. 6244
Barrel length (Długość lufy)	650 mm
Shooting distance (Dystans ostrzału)	15 m
Room temperature (Temp otoczenia)	19,4°C (12.05.2021), 19,6°C (13.05.2021)
Humidity (Wilgotność)	30% (12.05.2021), 31% (13.05.2021)
Conditioning (Kondycjonowanie)	wilgotność: 50% \pm 20%; temperatura: 21°C \pm 2.9°C
Sample condition (stan próbek)	Brak uwag
Penetration witness (Świadek)	Plastilina ROMA No.1
Deflection limit after shots (Dopuszczalne ugięcie po ostrzale)	44 mm
Hit pattern (preset) (Szablon ostrzału)	Zgodnie z wymaganiami klienta

1 Introduction

CFT Precyzja Sp. z o.o. provided five armor samples for testing on 12 May – 13 May 2021. This is a two part report. Section 2 is the ballistic resistance test report.

2 Ballistic Resistance Test

Five samples were used for ballistic resistance testing. The samples were conditioned for 24h hours: humidity: 50 % \pm 20 %; temperature: 21 °C \pm 2.9 °C.

2.1 Threats and Instrumentation

2.1.1 Threats*

- 7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (147 gr) projectiles (M80)

* The projectiles were fired from a universal receiver which was fitted with the appropriate barrel and mounted on a CFT Precyzja Testing mount.

2.1.2 Instrumentation

Projectile velocity measurements were obtained using Prototypa light gate. A digital caliper was used to measure the post-impact deformations observed in the backing material for selected shots of each sample. A digital still camera was used to document the test. Photographs are presented under each report.

2.2 Details of Test

The objective of this test was to conduct a ballistic resistance test on the samples in accordance with NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified) and the customer's request. Shot spacing between multiple impacts on a single sample was in accordance the referenced performance standard. Shots against the samples were performed at 0.0° obliquity.

For each shot, the target was strapped to a 5.5-in plastilina-clay/plywood backing and clamped to a rigid test fixture. All firings were conducted at 15.0 m from the target. The projectile velocities used for the test were in accordance with the referenced performance standard.

2.3 Customer request

Customer request Ballistic Resistance Test:

3 shots per sample.

Plastilina deformation was measured after 1,2,3 shoot.

2.4 Summary of Results

The results of the ballistic resistance test are shown in Table 1. The round-by-round data sheets for all testing performed are provided on the following page.

Table 1. Summary of Ballistic Resistance Test Results

Sample No.	Sample	Size (mm)	Weight (g)	Threat	Test Date	Target Obliq. (°)	Shot No.	Penetration Data				Plastilina Pre-/ Post-test drop
								Velocity (m/s)	Fair	Results	Def. (mm)	
P21/049	[REDACTED]	250 x 300	1380	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	12.05.2021	0.0	1	845.5	Yes	None	50.8	+/-
							2	845.2	Yes	None	48.5	
							3	847.3	Yes	None	46.5	
P21/050	[REDACTED]	250 x 300	1382	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	12.05.2021	0.0	1	849.3	Yes	None	36.0	+/-
							2	850.7	Yes	None	43.3	
							3	850.6	Yes	None	43.0	
P21/051	[REDACTED]	250 x 300	1478	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	12.05.2021	0.0	1	857.7	No	None	34,3*	bd/-
							2	838.8	Yes	None	38,0*	
							3	847.2	Yes	None	46,1*	
P21/052	[REDACTED]	250 x 300	982	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	13.05.2021	0.0	1	849.0	Yes	None	61,3	+/-
							2	855.1	Yes	None	64,2	
							3	855.6	Yes	None	58,8	
P21/053	[REDACTED]	250 x 300	1448	7.62 mm NATO FMJ 9.6 g (M80)	13.05.2021	0.0	1	858.5	No	None	67,2	+/-
							2	848.0	Yes	None	54,5	
							3	840.7	Yes	None	54,2	

Red colour of deflection means that depth is above limit 44 mm.

* Due to the plastilina test not being carried out, the results may be inaccurate

BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.
Job No.: N0310
Test Date: 12.05.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/049

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 25.5-26.1
Inset Thickness: 18.5-19.1

Weight (g): 1380
Plies/Laminates: 80w

Date Received: 10.05.2021
Via: Client
Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.4°C
BP: 1019 hPa
RH: 30%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barriell SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
(2) Customer request								
Pre-Test Drop Calibration	Time: 09:40 Temp: 44,8°C	Depth of Indent (mm):	18.0	18.8	17.8	17.1	18.2	18.0
Post-Test Drop Calibration	Time: 10:24 Temp: 38,7°C	Depth of Indent (mm):	16.0	14.6	16.7	15.6	14.1	15.4

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	845.5	845.5	Yes	None	50.8	0.0	
2	845.2	845.2	Yes	None	48.5	0.0	
3	847.3	847.4	Yes	None	46.5	0.0	

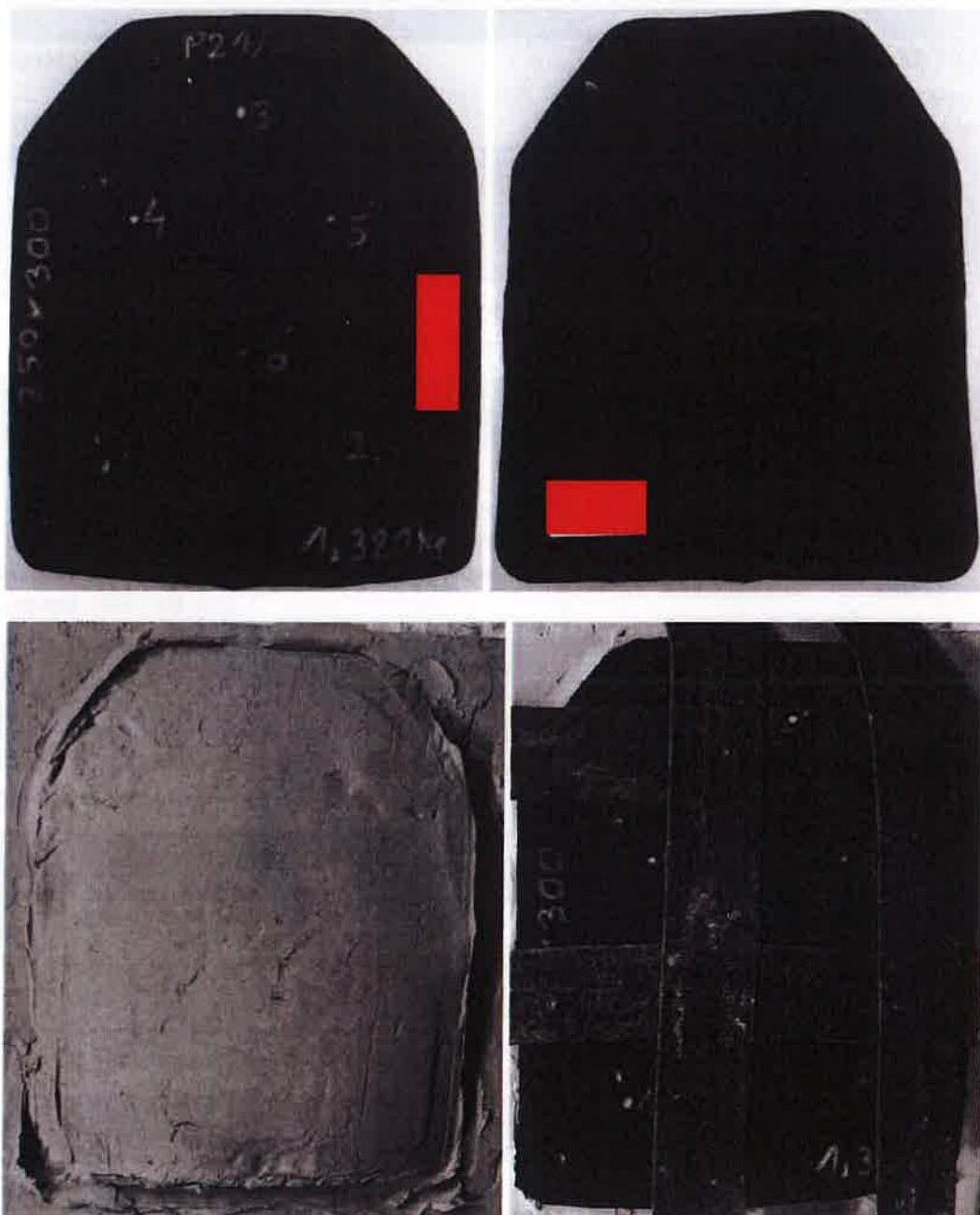
Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

Footnotes:

Deflection exceeded for 1, 2, 3 shot
Plastilina deflection limit in post-test drop exceeded

Before test – P21/049



After test – P21/049



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Job No.: N0310

Test Date: 12.05.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/050

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 24.7-25.9
Inset Thickness: 19.8-20.5

Weight (g): 1382
Plies/Laminates: 126w

Date Received: 10.05.2021
Via: Client
Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.4°C
BP: 1019 hPa
RH: 30%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.	
(2) Customer request									
Pre-Test Drop Calibration	Time: 14:25 Temp: 45,2°C	Depth of Indent (mm):	19.0	17.8	19.7	17.6	19.2	18.7	
Post-Test Drop Calibration	Time: bd Temp: bd	Depth of Indent (mm):	bd	bd	bd	bd	bd	bd	
Shot No.	Vel. (m/s)	Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes			
1	849.3	849.1	Yes	None	36.0	0.0			
2	850.7	850.7	Yes	None	43.3	0.0			
3	850.6	850.6	Yes	None	43.0	0.0			

Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

Footnotes:

Due to the plastiline post- test not being carried out, the results may be inaccurate
No results for plastilina deflection in post-test drop

Before test – P21/050



After test – P21/050



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.
Job No.: N0310
Test Date: 12.05.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/051

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 25.8-26.2
Inset Thickness: 19.2-20.1

Weight (g): 1478
Plies/Laminates: 76w

Date Received: 10.05.2021
Via: Client
Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.4°C
BP: 1019 hPa
RH: 30%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)
(2) Customer request

	Time:	Depth of Indent (mm):	Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
Pre-Test Drop Calibration	bd Temp: bd		bd	bd	bd	bd	bd	bd
Post-Test Drop Calibration	15:10 Temp: 37,7°C		14.9	14.8	bd	bd	bd	bd

Shot No.	Vel. (m/s)	Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	857.7	No	None	34.3	0.0	oversize velocity
2	838.8	Yes	None	38.0	0.0	
3	847.2	Yes	None	46.1	0.0	

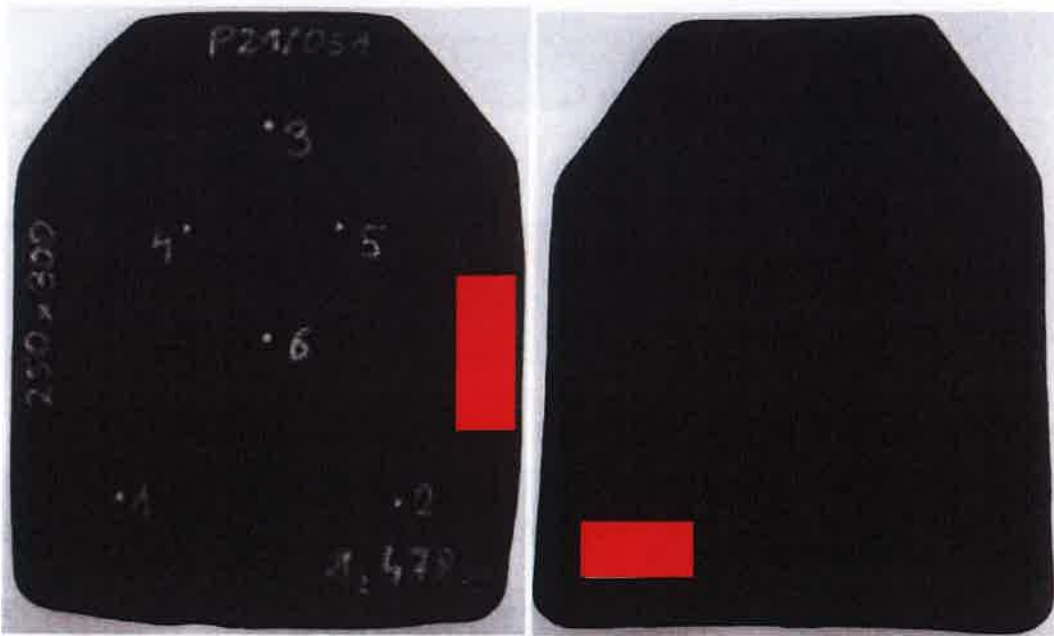
Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

Footnotes:

Due to the plastiline pre-test not being carried out, the results may be inaccurate
Deflection limit exceeded for 3 shot
No results for plastilina deflection in pre- and post-test drop

Before test – P21/051



After test – P21/051



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Job No.: N0310

Test Date: 13.05.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/052

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 19.9-21.1
Inset Thickness: 14.2-14.8

Weight (g): 982
Plies/Laminates: 94w

Date Received: 10.05.2021

Via: Client

Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.6°C
BP: 1021 hPa
RH: 31%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
(2) Customer request								
Pre-Test Drop Calibration	Time: 10:08 Temp: 46,2°C	Depth of Indent (mm):	17,8	19,2	22,0	21,5	18,8	19,9
Post-Test Drop Calibration	Time: 10:32 Temp: 40,8°C	Depth of Indent (mm):	19,1	17,2	17,3	16,8	16,5	17,4

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	849.0	849.0	Yes	None	61.3	0.0	oversize velocity
2	855.1	855.1	Yes	None	64.2	0.0	
3	855.6	855.7	Yes	None	58.8	0.0	

Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

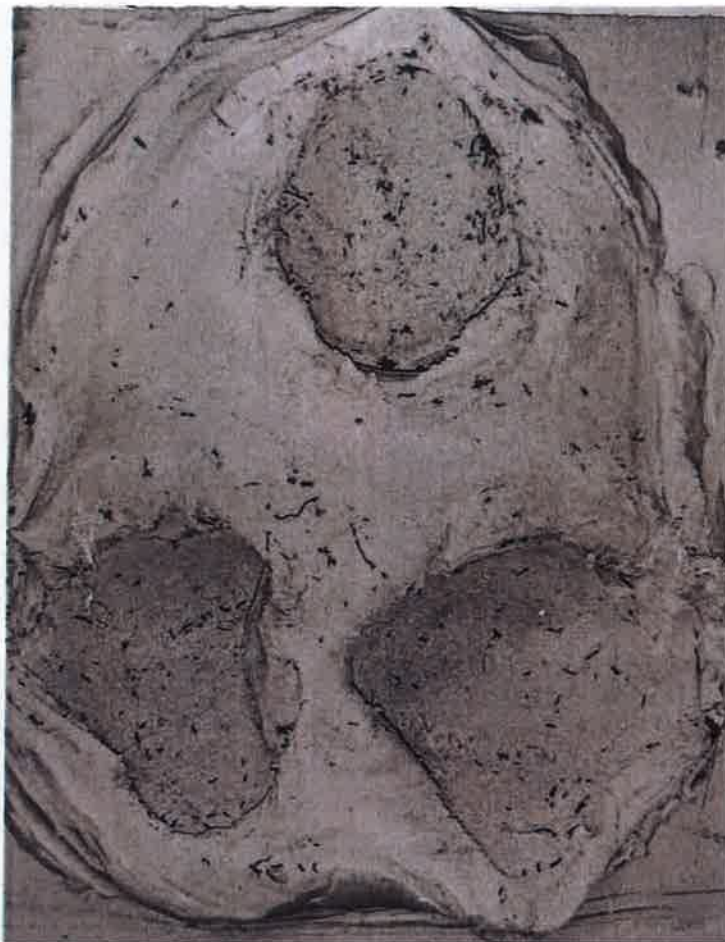
Footnotes:

Due to the plastiline pre-test not being carried out, the results may be inaccurate
Deflection limit exceeded for 1, 2, 3 shot

Before test – P21/052



After test – P21/052



BALLISTIC RESISTANCE TEST

CFT Precyzja Sp. z o.o.

ul. Polna 6,
05-152 Czosnów

Client: CFT Precyzja Sp. z o.o.

Job No.: N0310

Test Date: 13.05.2021

Test Panel

Description: XXXXXXXXXX

Manufacturer: Client

Sample No.: P21/053

Size (mm): 250 x 300
Thickness: 25.3-25.9
Inset Thickness: 20.8

Weight (g): 1448
Plies/Laminates: 76w

Date Received: 10.05.2021
Via: Client
Returned: Client

Setup

Shot Spacing: NIJ-STD-0101.06
Level III
Witness Panel: Plastilina-clay
Backing Material: 5.5-in Plastilina
ROMA No.1 /plywood
Condition: Ambient

Vel. Location to Target (m): 2
Range to Target (m): 15
Target to Witness (m): 0

Temp: 19.6°C
BP: 1021 hPa
RH: 31%
Gunner: Zając Kamil
Recorder: Konieczny Piotr

Ammunition

Projectile	Bullet Weight	Weapon
7.62 mm NATO FMJ (M80)	147grs / 9.6g	Test barrel SN. 6244 650 mm

Applicable Standards or Procedures

(1) NIJ-STD-0101.06 Level III (Modified)			Drop 1	Drop 2	Drop 3	Drop 4	Drop 5	Avg.
(2) Customer request								
Pre-Test Drop Calibration	Time: 13:15 Temp: 46,3°C	Depth of Indent (mm):	21,3	20,5	19,8	21,5	20,9	20,8
Post-Test Drop Calibration	Time: 13:46 Temp: 41,1°C	Depth of Indent (mm):	17,3	16,2	17,1	16,9	15,2	16,5

Shot No.	Vel. (m/s)		Fair	Penetration	Deformation (mm)	Obliquity (°)	Footnotes
1	858.5	858.5	No	None	67.2	0.0	oversize velocity
2	848.0	848.0	Yes	None	54.5	0.0	
3	840.7	840.7	Yes	None	54.2	0.0	

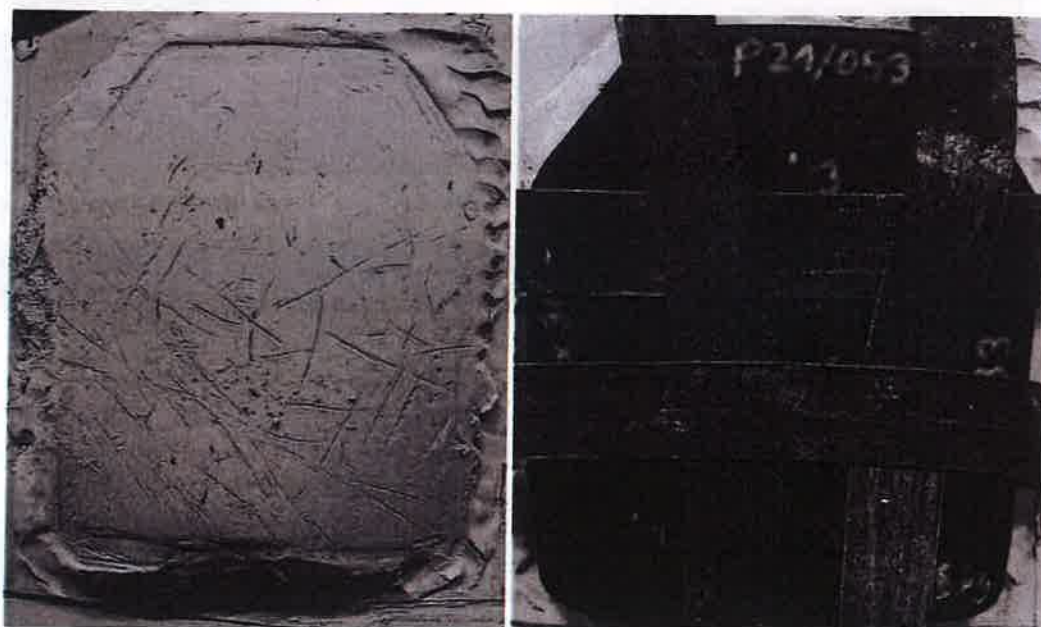
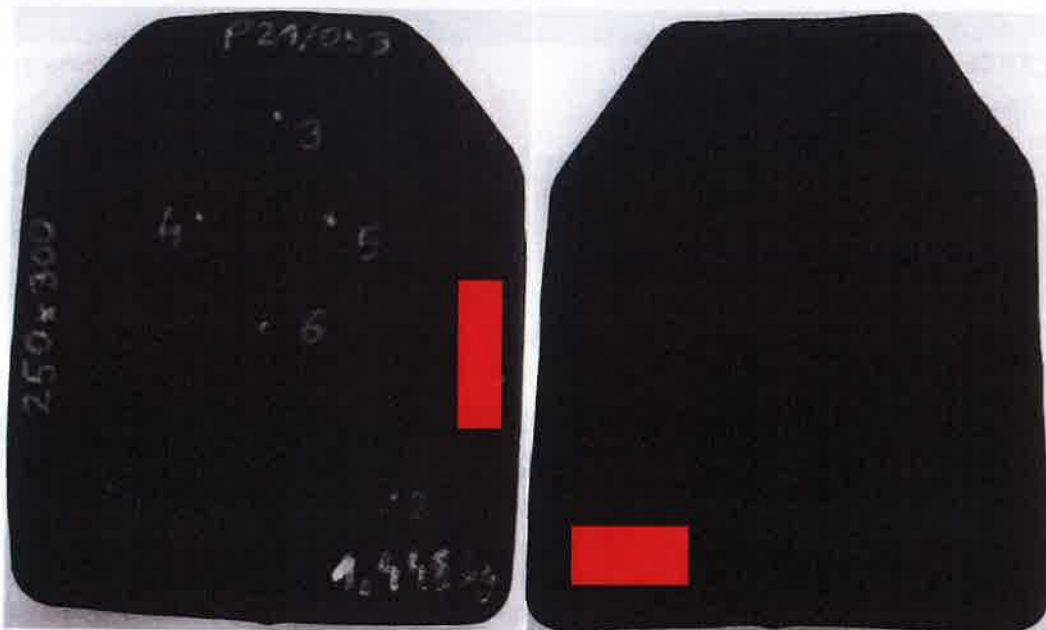
Remarks:

Required velocity: 847 ± 9.1 m/s

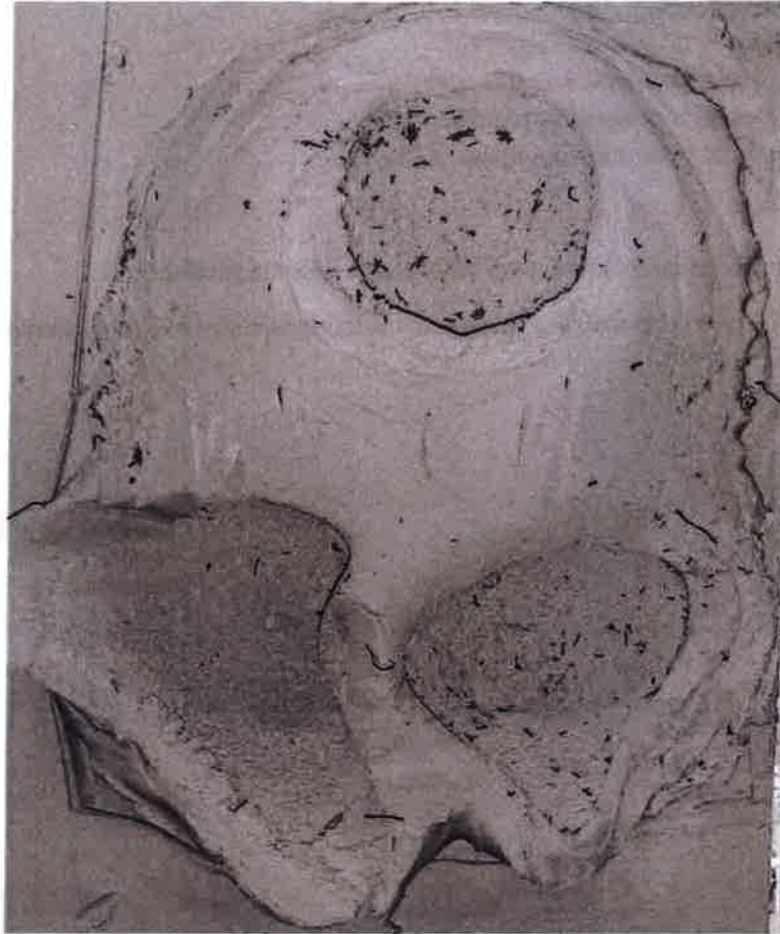
Footnotes:

Due to the plastiline pre-test not being carried out, the results may be inaccurate,
Deflection limit exceeded for 1, 2, 3 shot
Plastilina deflection limit in post-test drop exceeded

Before test – P21/053



After test – P21/053



Niepewność pomiaru nie przekracza odpowiednio:

- Prędkość pocisków $\pm 0,3\%$
- Dokładność masy $\pm 0,002\text{kg}$
- Dokładność kąta ostrzału $\pm 2\%$
- Dokładność pomiaru temperatury $\pm 0,2^\circ\text{C}$
- Dokładność pomiaru wilgotności $\pm 2\%$

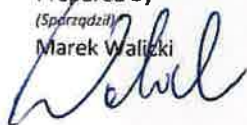
Powyższe wyniki badań odnoszą się wyłącznie do badanej próbki.

Bez pisemnej zgody laboratorium badawczego raport nie może być powielany inaczej, jak tylko w całości.

Prepared by

(Sprządził)

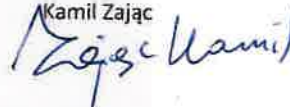
Marek Waligki



Approved by

(Zatwierdził)

Kamil Zając



	<p>CFT Precyzja Sp. z o.o. Laboratorium Balistyczne Polna 6, 05-152 Czosnów Poland Office: +48 22 785 10 57 Fax: +48 22 785 10 19</p>	  AB 1771
-----------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Date of issue: 28.01.2022

TEST REPORT

Report number 005/01/2022

Testing of the ballistic resistance of material.

Report number	: 005/01/2022
Date of delivery samples	: 20.01.2022
Date of test	: 21.01.2022
Head of testing	: Paweł Leoniuk
Customer	: CFT Precyzja sp. z o. o.
Samples	: P22/016 DSM PE3 Size: 292 x 242 x 27-28 mm Weight: 1400 g
Manufacturer	: CFT Precyzja sp. z o. o.

Test conditions

Required Test method	PN-V-87000:2011 (Modified)
Tested level of protection	K3C (Modified)
Deviations from the norm	Testing of the ballistic resistance of new sample: 1 sample per level K3C
Test equipment and its specifications	
Calibre	7.62 x 51 mm (M80)
Bullet type	FMJS
Bullet mass	9.6 ± 0.1 g
Bullet velocity	840 ± 15 m/s
Weapon	Test barriell SN. 6244
Barriell length	650 mm
Velocity measurement	2 m before sample
Shooting distance	15.0 m
Room temperature	24.4 °C
Humidity	23%
Conditioning	24h Humidity: 50% ± 20%; Temperature: 20°C ± 5°C
Samples condition	New
Penetration witness	Plastilina
Deflection limit after shots	40 mm
Hit pattern (preset)	According with the standard

Backing Material Test

Penetration witness (Plastilina) test were conducted. The acceptable deflection of the plastilina is 25 ± 3 mm. The results of the tests are given below.

No.	Result 1 [mm]	Result 2 [mm]	Result 3 [mm]	Comments
1	25.6	25.3	25.7	Before 1 st test
2	24.5	25.2	24.2	Before 2 nd test

Test results

2022-01-21_P22_016

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

P22/016			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	836,1	836,0	BFS = 49,0 mm
2	836,4	836,3	BFS = 38,2 mm
3	830,1	830,0	BFS = 33,8 mm
4	841,1	841,0	BFS = 34,0 mm
5	842,2	842,0	BFS = 47,5 mm
6	845,4	845,3	BFS = 52,3 mm
Śred	838,5	838,4	
Maks	845,4	845,3	
Min	830,1	830,0	
Delta	15,3	15,3	
SDev	5,5	5,5	

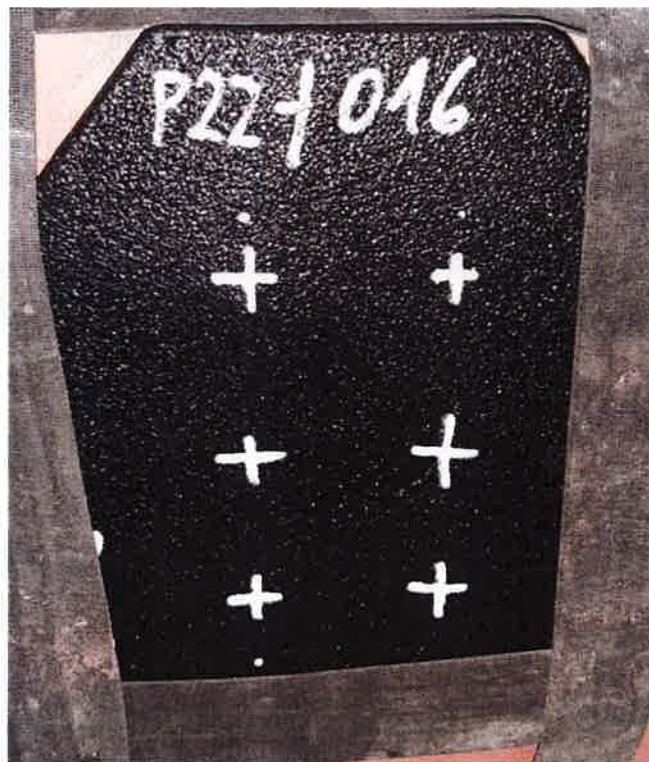
Legend

- (+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation
- (-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration
- (S) splinters allowed designation
- (B) bulge back surface of an armour
- (C) crack
- (Fv+) Fair – faster impact velocity
- (UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity
- (Fo- / UFo-) Fair / Unfair – shorter distance

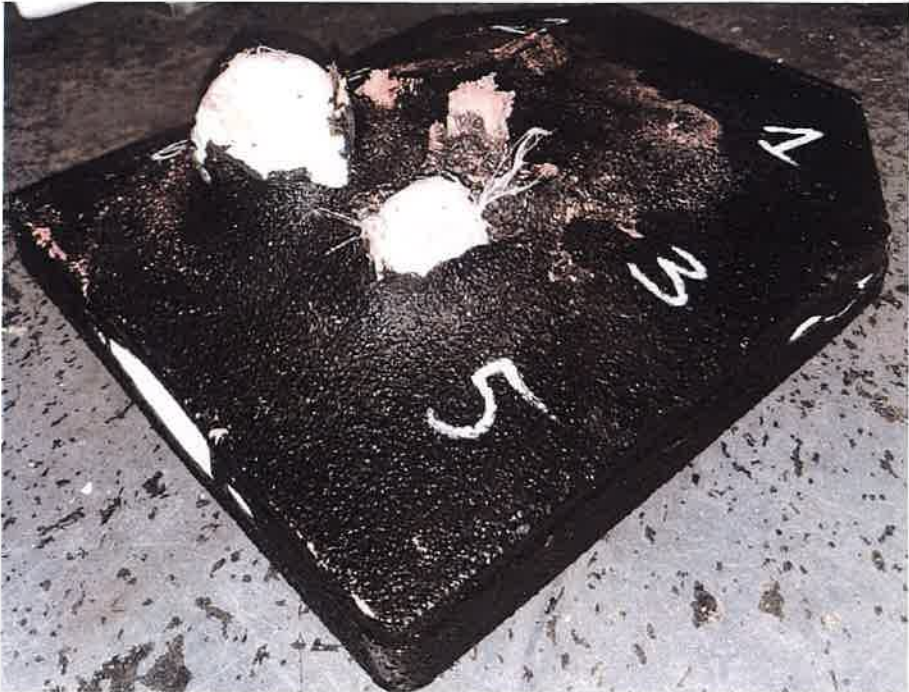
Comments:

All hits qualified as fair. All shots with normal impact velocity. No sample penetration was observed. For 2nd, 3rd and 4th shots deflection of backing material (BFS) is below deflection limit after shots (BFS < 40 mm). For 1st, 5th and 6th shots deflection of backing material (BFS) is exceeds deflection limit after shots (BFS > 40 mm).

Before test



After test



The tested sample does not meet the requirements of PN-V-87000:2011 (Modified) level K3C (Modified) with deviations from the norm.

The measurement uncertainty does not exceed respectively:

- Projectile velocity $\pm 0.3\%$
- Mass accuracy ± 0.002 kg
- Accuracy of the firing angle $\pm 2\%$
- Accuracy of temperature measurement $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
- Accuracy of humidity measurement $\pm 2\%$


The above test results refer only to the tested samples.

The report may not be reproduced in part without the written consent of the testing laboratory.

Prepared by
(Sporządził)
Kamil Pietroń



Approved by
(Zatwierdził)
Kamil Zając





PRECYZJA

CFT Precyzja Sp. z o.o.
Laboratorium Balistyczne
Polna 6, 05-152 Czosnów Poland
Office: +48 22 785 10 57
Fax: +48 22 785 10 19



Date of issue: 28.01.2022

TEST REPORT

Report number 006/01/2022

Testing of the ballistic resistance of material.

Report number	: 006/01/2022
Date of delivery samples	: 20.01.2022
Date of test	: 21.01.2022
Head of testing	: Paweł Leoniuk
Customer	: CFT Precyzja sp. z o. o.
Samples	: P22/017 TEIJIN PE Size: 294 x 242 x 32-34 mm Weight: 1620 g
Manufacturer	: CFT Precyzja sp. z o. o.

Test conditions

Required Test method	PN-V-87000:2011 (Modified)
Tested level of protection	K3C (Modified)
Deviations from the norm	Testing of the ballistic resistance of new sample: 1 sample per level K3C
Test equipment and its specifications	
Calibre	7.62 x 51 mm (M80)
Bullet type	FMJS
Bullet mass	9.6 ± 0.1 g
Bullet velocity	840 ± 15 m/s
Weapon	Test barriell SN. 6244
Barriell length	650 mm
Velocity measurement	2 m before sample
Shooting distance	15.0 m
Room temperature	24.4 °C
Humidity	23%
Conditioning	24h Humidity: 50% ± 20%; Temperature: 20°C ± 5°C
Samples condition	New
Penetration witness	Plastilina
Deflection limit after shots	40 mm
Hit pattern (preset)	According with the standard

Backing Material Test

Penetration witness (Plastilina) test were conducted. The acceptable deflection of the plastiline is 25 ± 3 mm. The results of the tests are given below.

No.	Result 1 [mm]	Result 2 [mm]	Result 3 [mm]	Comments
1	25.6	25.3	25.7	Before 1 st test
2	24.5	25.2	24.2	Before 2 nd test

Test results

2022-01-21_P22_017

Angle: 90 degree = 0 degree NATO

P22/017			
Spis	V5	V5	Notatki
	m/s	m/s	
1	839,8	839,6	BFS = 33,0 mm
2	840,6	840,5	BFS = 31,0 mm
3	829,9	829,7	BFS = 23,0 mm
4	839,7	839,6	BFS = 23,5 mm
5	841,5	841,5	BFS = 13,0 mm
6	838,6	838,4	BFS = 21,0 mm
Śred	838,3	838,2	
Maks	841,5	841,5	
Min	829,9	829,7	
Delta	11,7	11,7	
SDev	4,3	4,3	

Legend

(+) Partial Penetration (PP), no penetration / no splinters designation

(-) Complete Penetration (CP), full witness plate penetration

(S) splinters allowed designation

(B) bulge back surface of an armour

(C) crack

(Fv+) Fair – faster impact velocity

(UFv+ / UFv-) Unfair – faster / slower impact velocity

(Fo- / UFo-) Fair / Unfair – shorter distance

Comments:

All hits qualified as fair. All shots with normal impact velocity. No sample penetration was observed. For all shots deflection of backing material (BFS) is below deflection limit after shots (BFS < 40 mm).

Before test



After test



The tested sample meets the requirements of PN-V-87000:2011 (Modified) level K3C (Modified) with deviations from the norm.

The measurement uncertainty does not exceed respectively:

- Projectile velocity $\pm 0.3\%$
- Mass accuracy ± 0.002 kg
- Accuracy of the firing angle $\pm 2\%$
- Accuracy of temperature measurement $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
- Accuracy of humidity measurement $\pm 2\%$

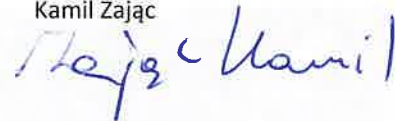
The above test results refer only to the tested samples.

The report may not be reproduced in part without the written consent of the testing laboratory.

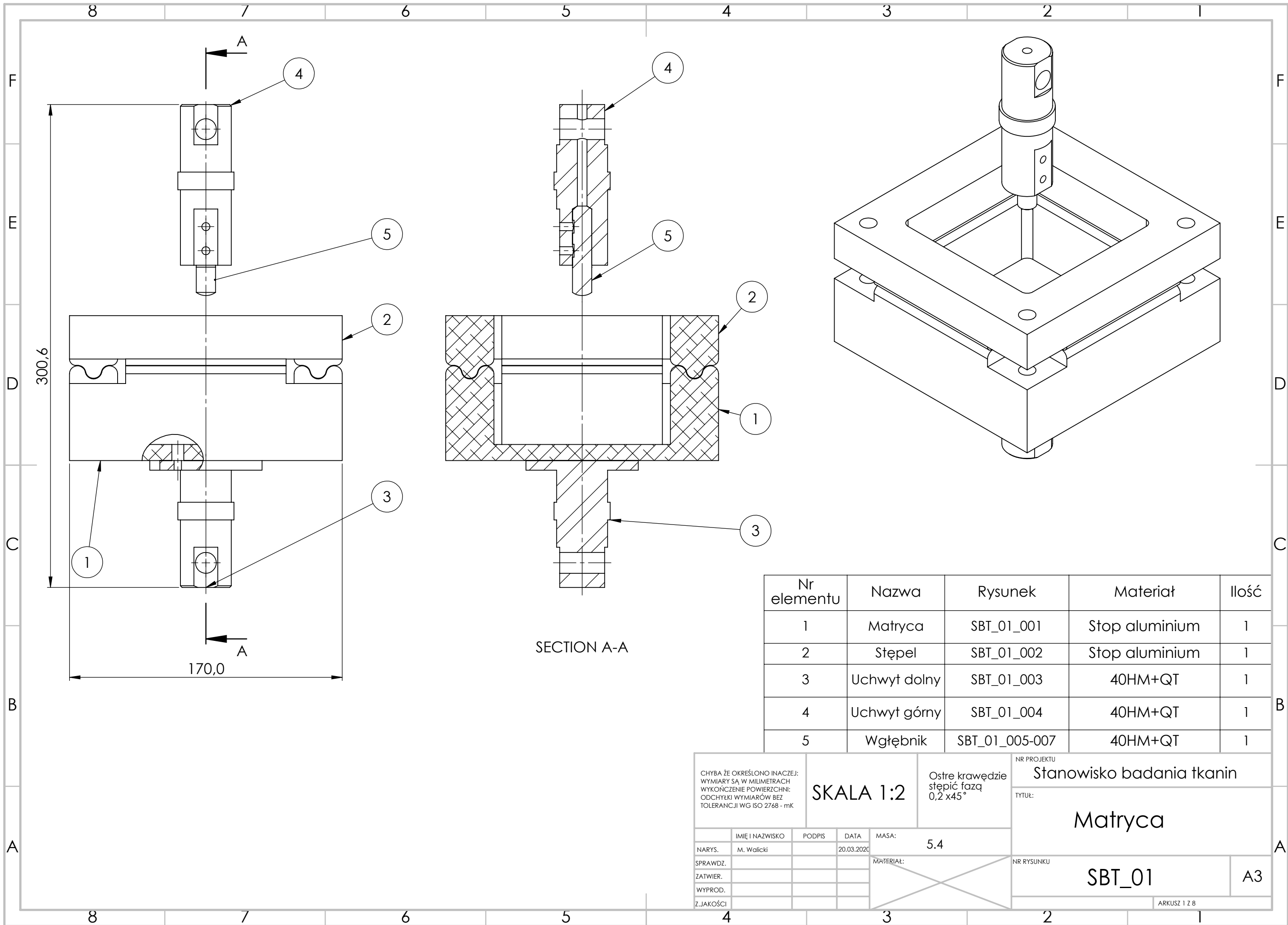
Prepared by
(Sporządził)
Kamil Pietroń



Approved by
(Zatwierdził)
Kamil Zajac



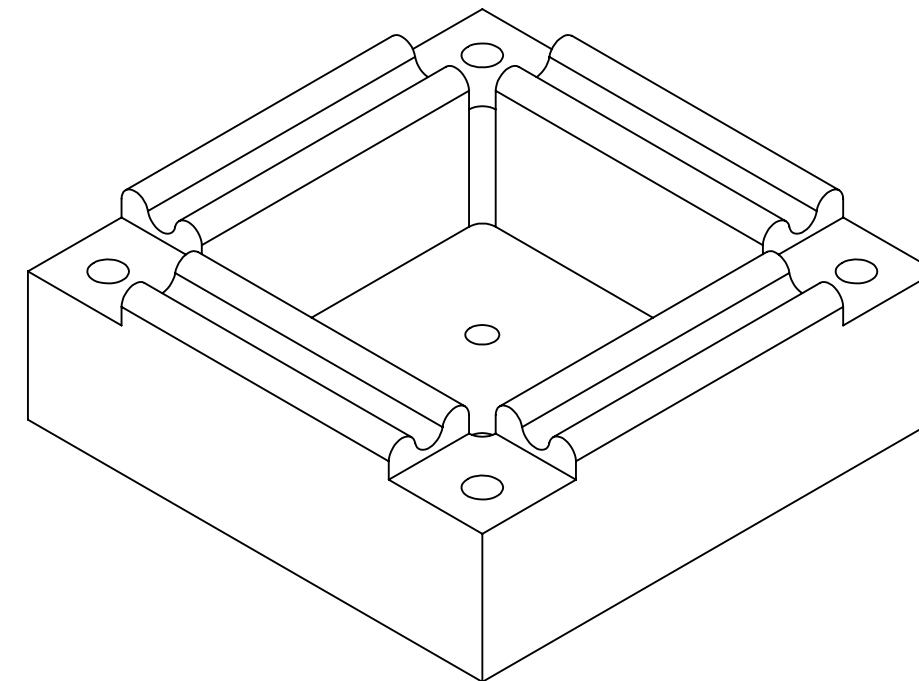
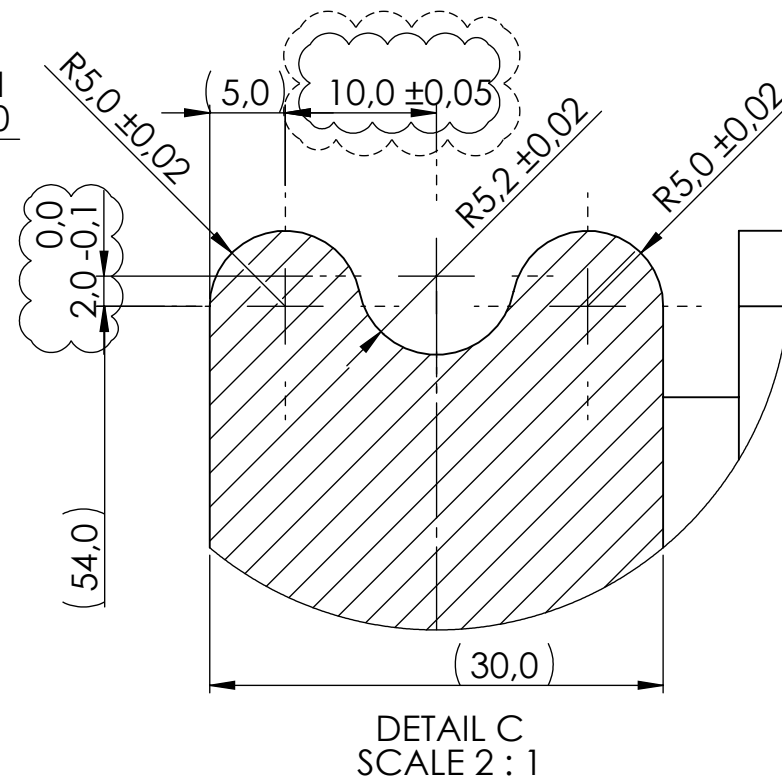
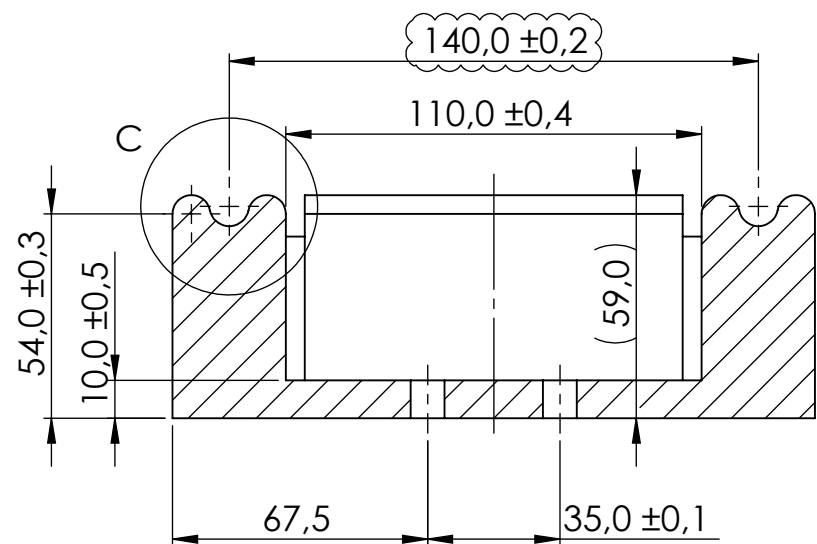
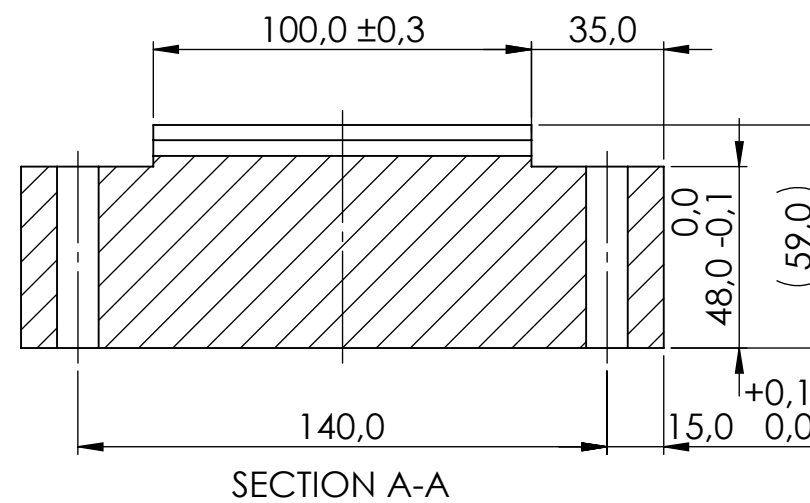
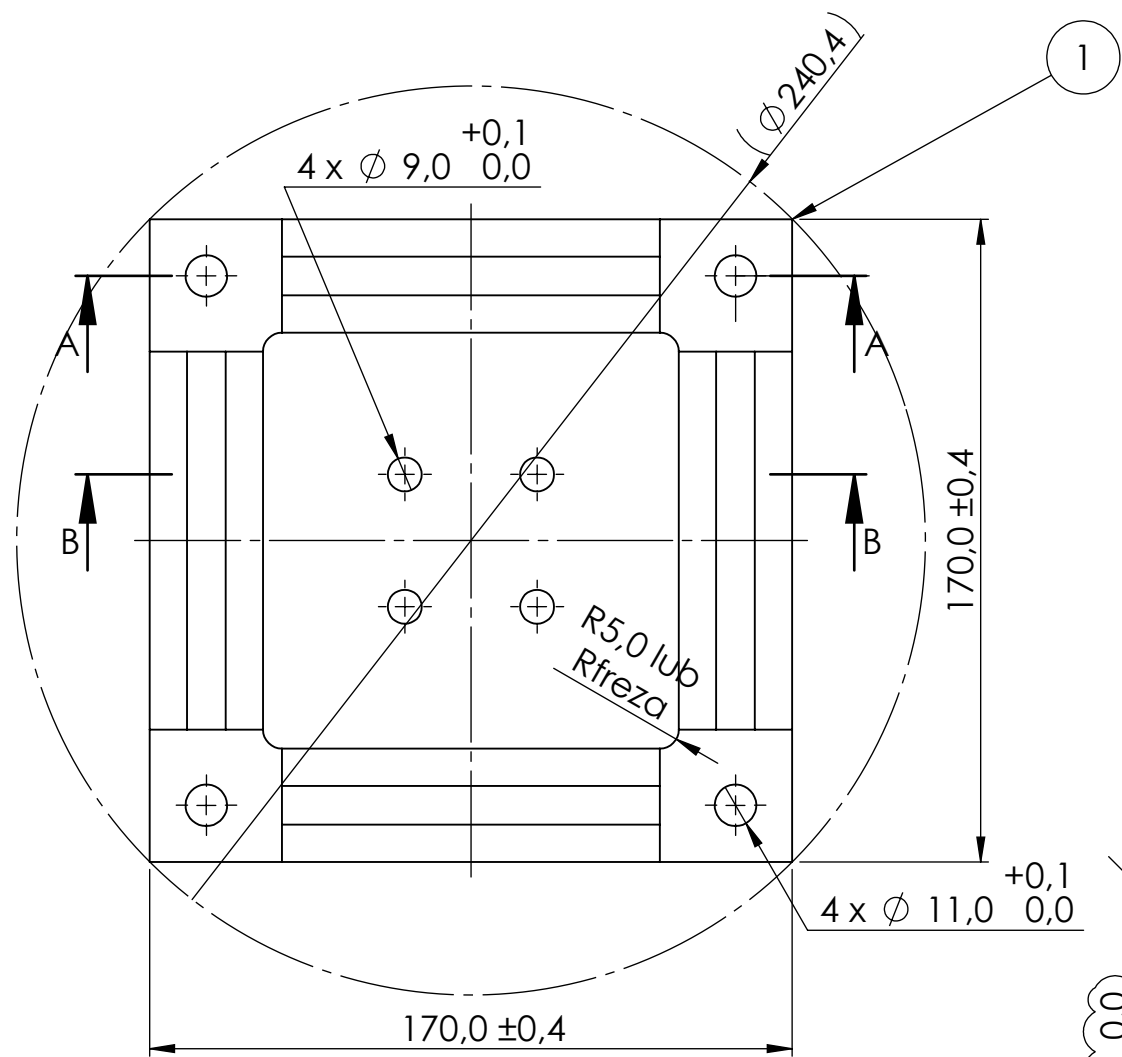
Załącznik nr. 7 – Rysunki konstrukcyjne układu mocowania próbki



SECTION A-A

Nr elementu	Nazwa	Rysunek	Materiał	Ilość
1	Matryca	SBT_01_001	Stop aluminium	1
2	Stępel	SBT_01_002	Stop aluminium	1
3	Uchwyt dolny	SBT_01_003	40HM+QT	1
4	Uchwyt górny	SBT_01_004	40HM+QT	1
5	Wgłębnik	SBT_01_005-007	40HM+QT	1

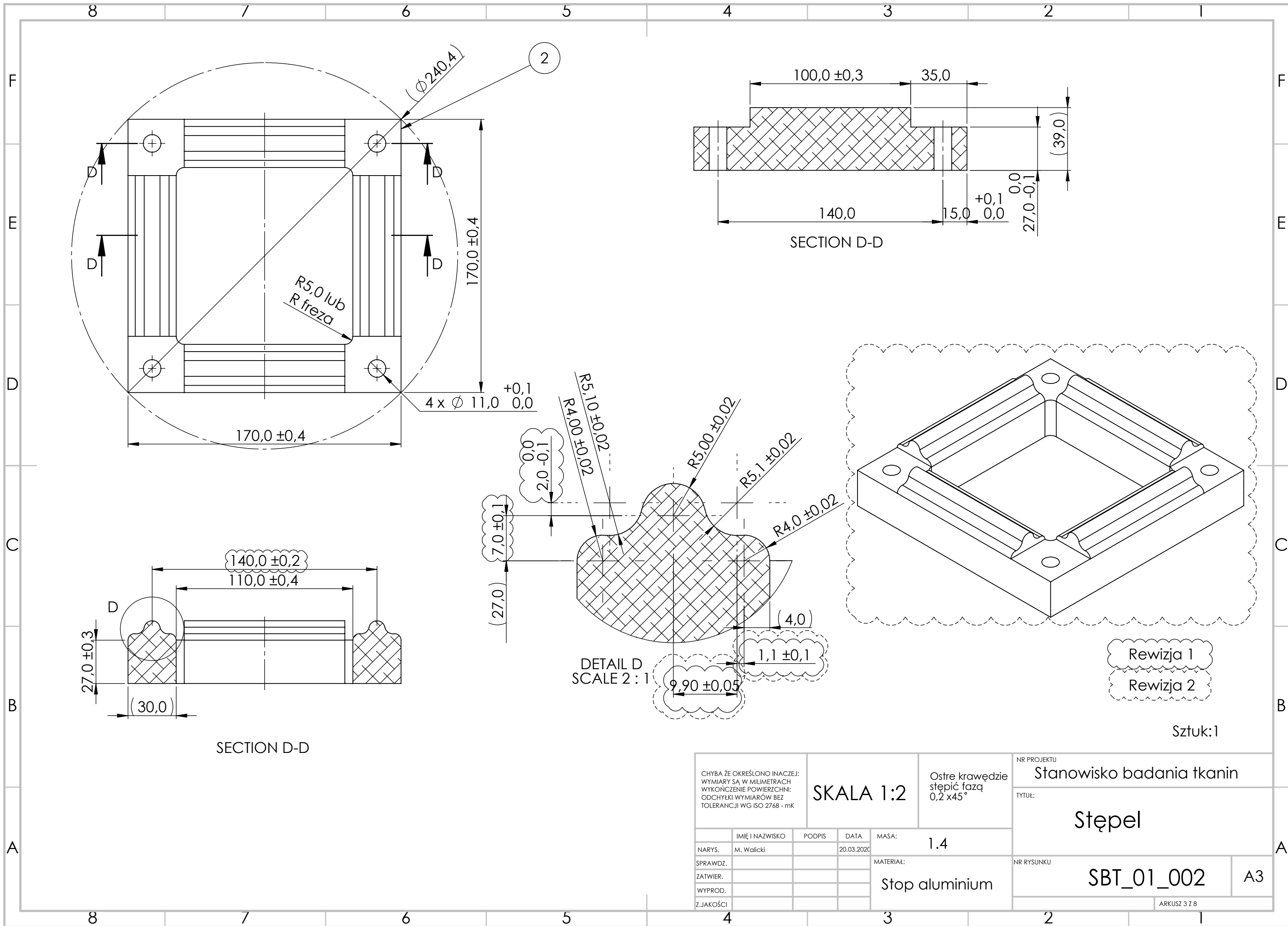
CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ: WYMIARY SĄ W MILIMETRACH WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI: ODCHYLEŃKI WYMIARÓW BEZ TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK		SKALA 1:2		Ostre krawędzie stępic faza 0,2 x45°		NR PROJEKTU Stanowisko badania tkanin	
IMIĘ I NAZWISKO M. Walicki		PODPIS		DATA 20.03.2020		TYTUŁ: Matryca	
NARYS.		MASA: 5.4		MATERIAŁ:		NR RYSUNKU SBT_01	
SPRAWDZ.		WYPROD.		Z.JAKOŚCI		A3	
ARKUSZ 1 Z 8							



Rewizja 1
Rewizja 2

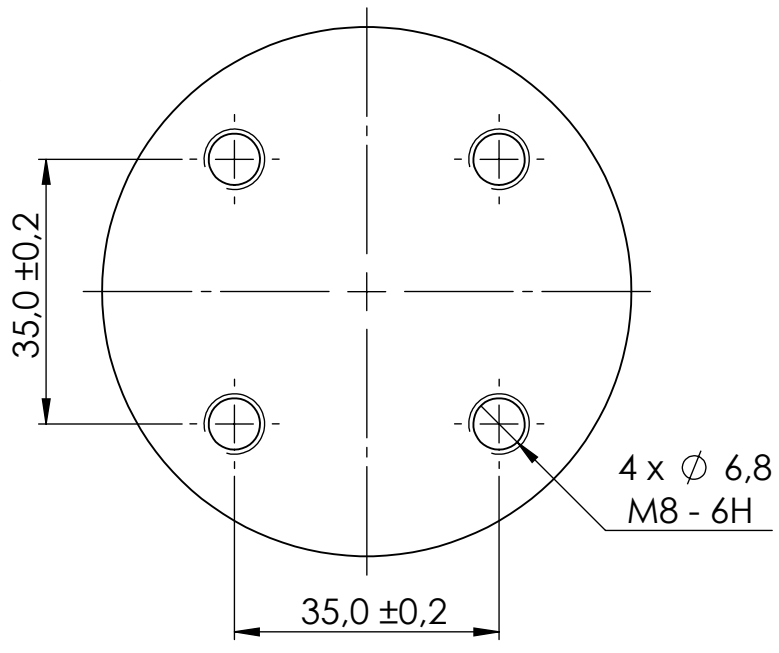
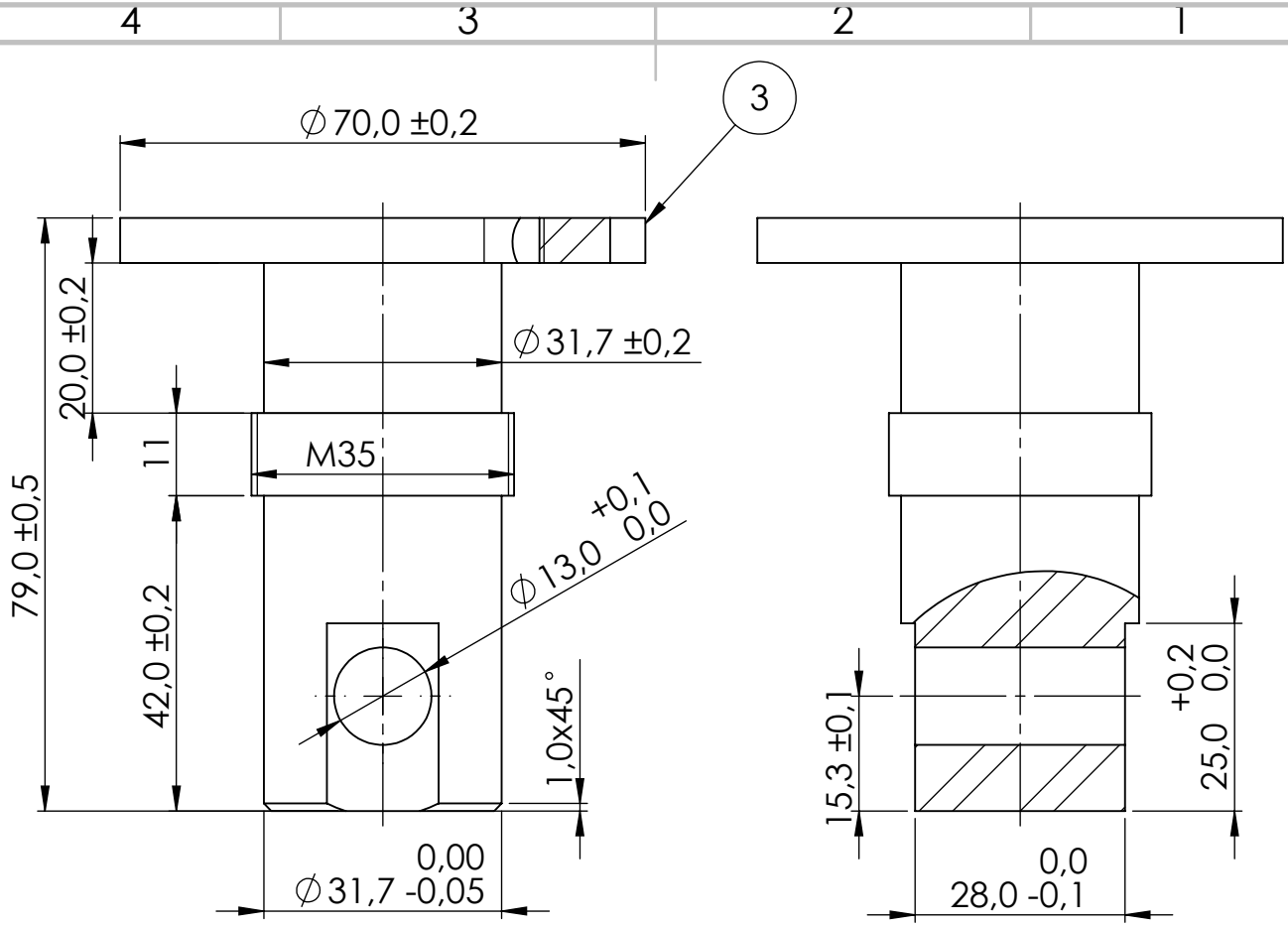
Sztuk: 1

CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ: WYMIARY SĄ W MILIMETRACH WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI: ODCHYLENIA WYMIARÓW BEZ TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK				SKALA 1:2		Ostre krawędzie stępic faza $0,2 \times 45^\circ$		NR PROJEKTU Stanowisko badania tkanin	
								TYTUŁ: Matryca	
								NR RYSUNKU SBT_01_001	
								A3	
								ARKUSZ 2 Z 8	



CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ: WYMIARY SĄ W MILIMETRACH WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI: ODCHYLEKI WYMIARÓW BEZ TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK				SKALA 1:2		Ostre krawędzie stępic faza $0,2 \times 45^\circ$		NR PROJEKTU Stanowisko badania tkanin	
								TYTUŁ: Stępel	
								NR RYSUNKU SBT_01_002	
								A3	
								ARKUSZ 3 Z 8	

	IMIĘ I NAZWISKO	PODPIS	DATA	MASA:	1.4
NARYS.	M. Walicki		20.03.2020		
SPRAWDZ.				MATERIAŁ:	Stop aluminium
ZATWIER.					
WYPROD.					
Z.JAKOŚCI					



Sztuk:1

CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ:
WYMIARY SĄ W MILIMETRACH
WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI:
ODCHYLEŃKI WYMIARÓW BEZ
TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK

SKALA 1:1

Ostre krawędzie
stępieć fazą
0,2 x45°

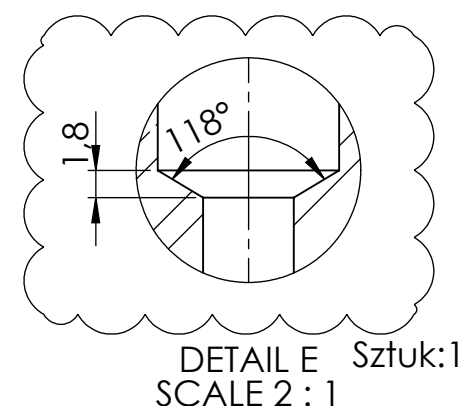
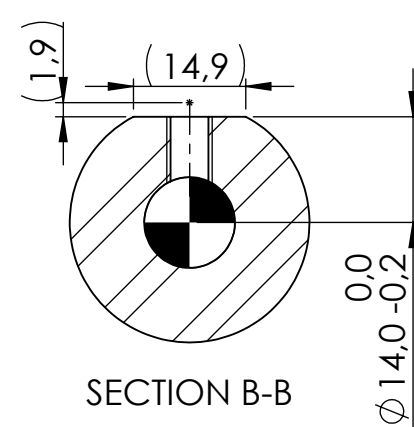
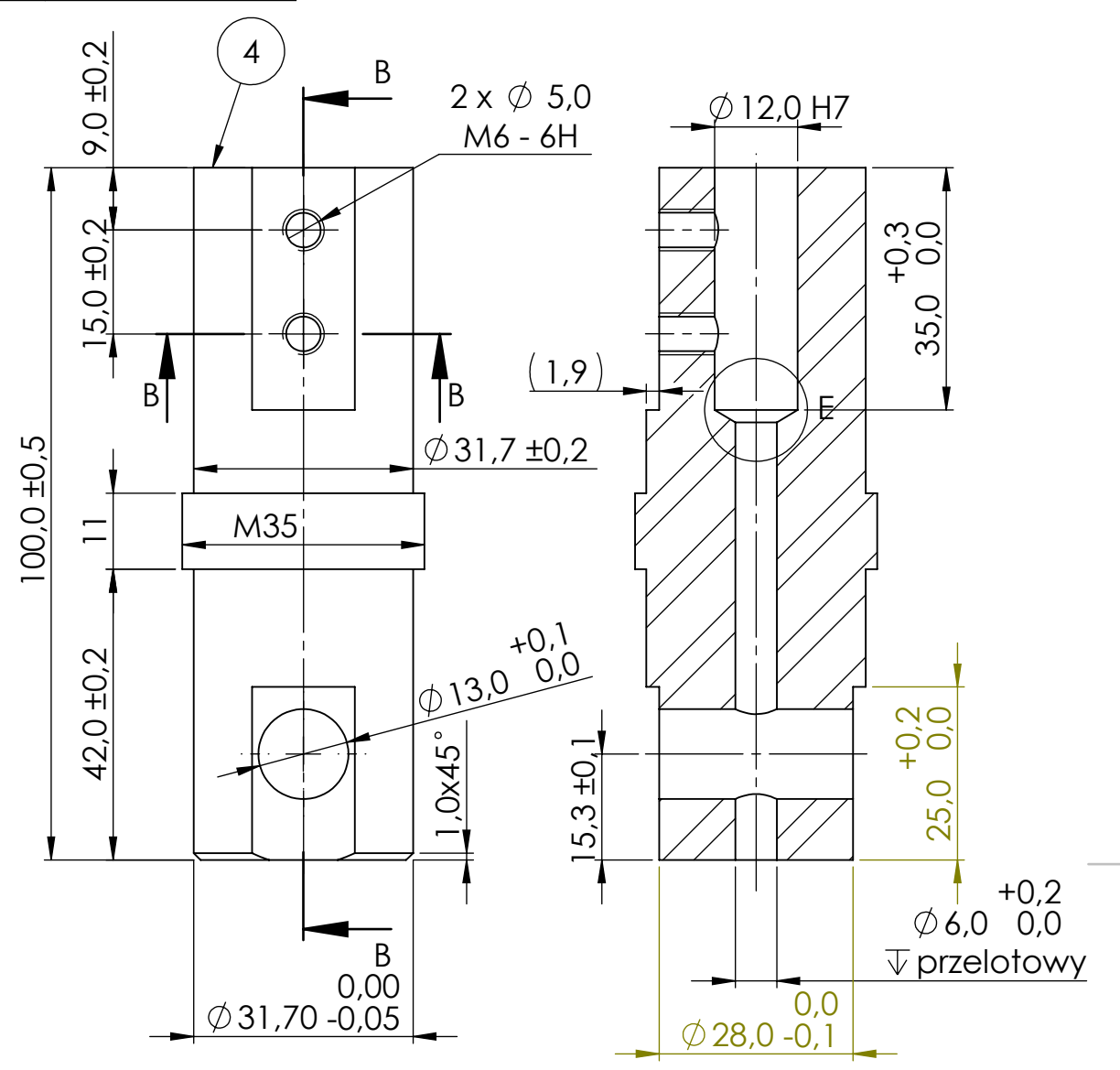
NR PROJEKTU
Stanowisko badania tkanin

TYTUŁ:
Uchwyt dolny

A	IMIĘ I NAZWISKO	PODPIS	DATA	MASA:	0.6
	NARYS.	M. Walicki	20.03.2020		
	SPRAWDZ.			MATERIAŁ:	
	ZATWIER.			40HM+QT	
	WYPROD.				
Z.JAKOŚCI					

NR RYSUNKU	SBT_01_003	A4
ARKUSZ 4 Z 8		

$\varnothing 12,0 H7$ $\varnothing 12,0 0,027$
 $\varnothing 12,0 0,000$



CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ:
 WYMIARY SĄ W MILIMETRACH
 WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI:
 ODCHYLEŃKI WYMIARÓW BEZ
 TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK

SKALA 1:1

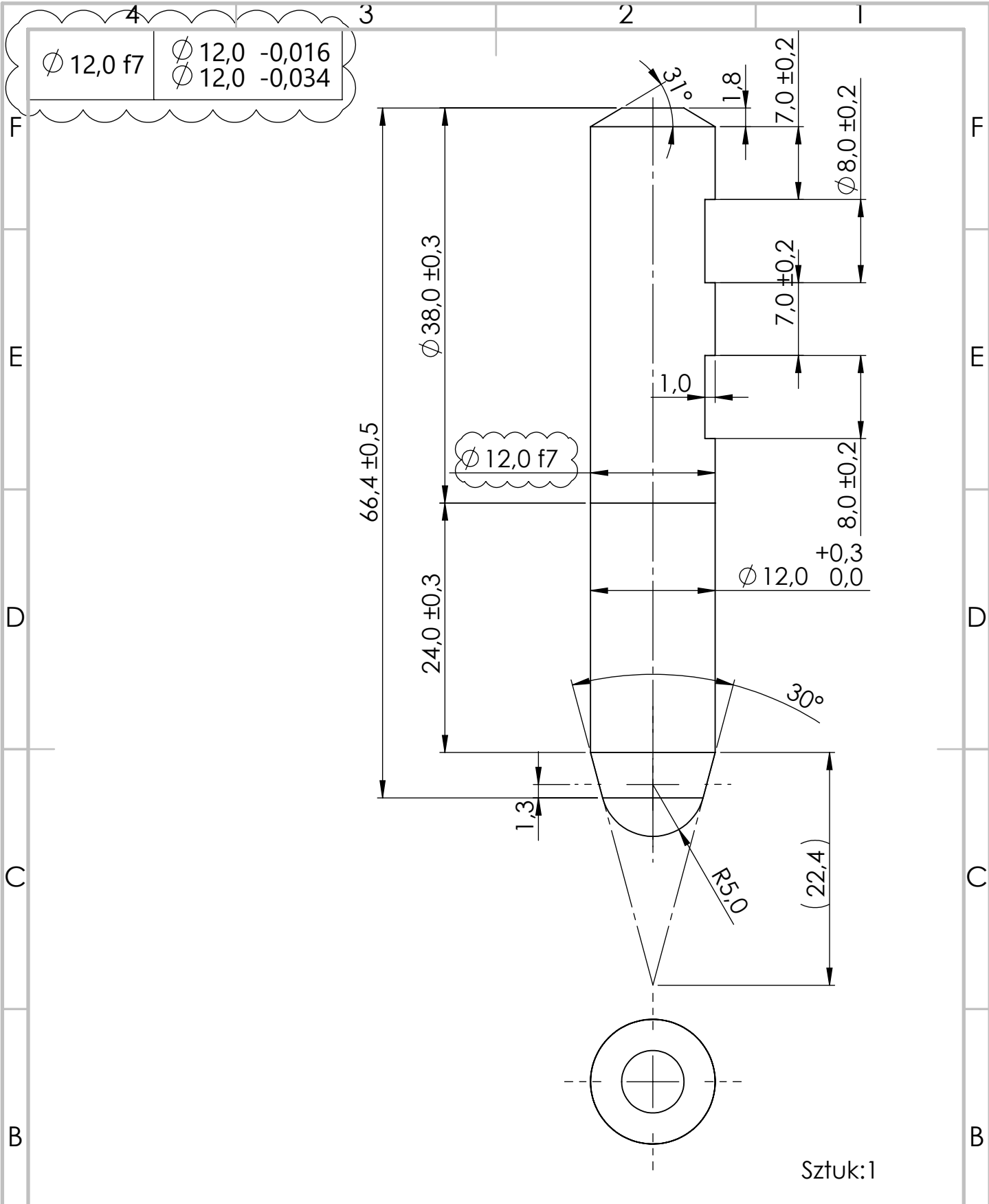
Ostre krawędzie
 stępić fazą
 0,2 x 45°

NR PROJEKTU
Stanowisko badania tkanin

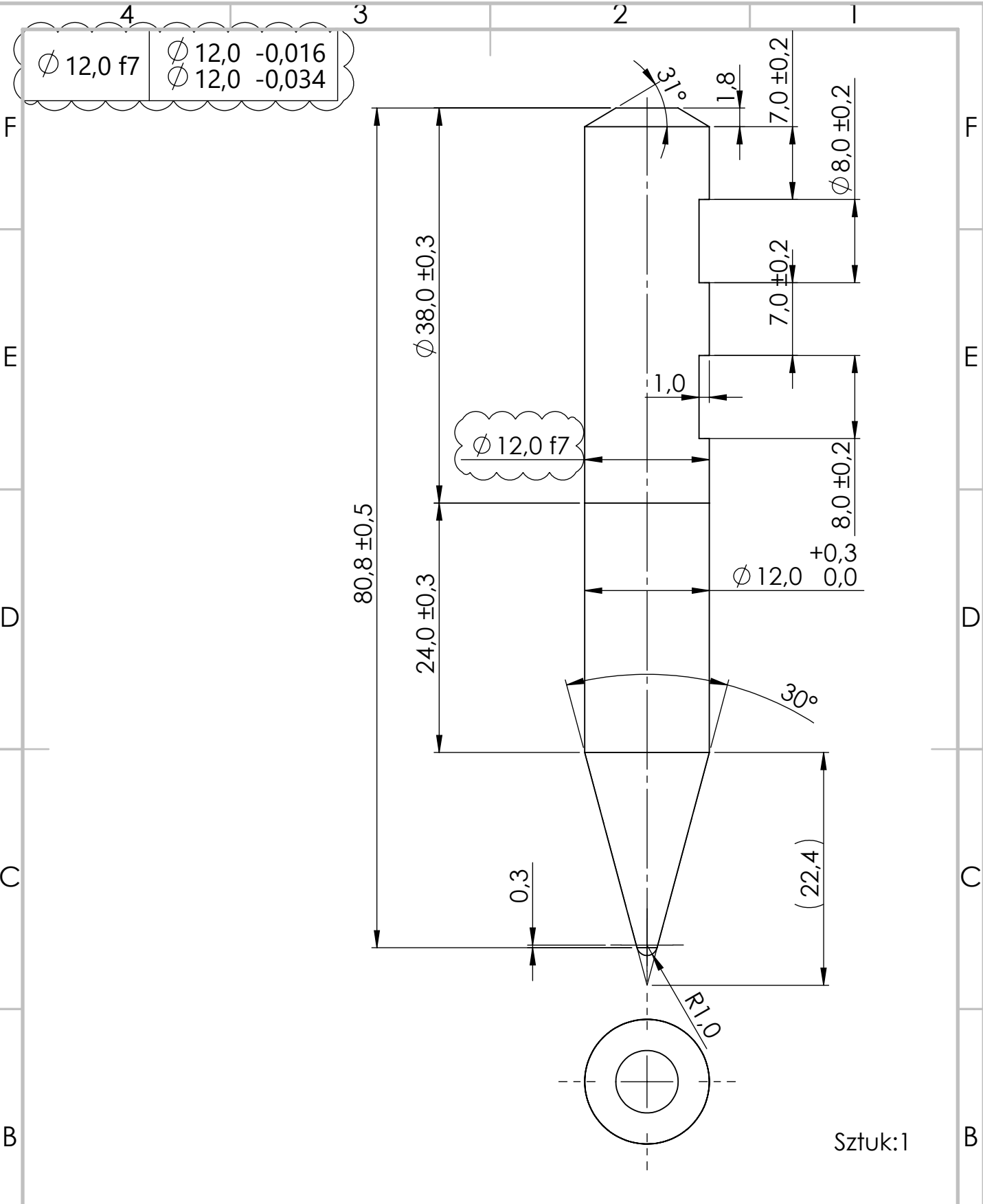
TYTUŁ:
Uchwyt górny

IMIĘ I NAZWISKO	PODPIS	DATA	MASA:
NARYS. M. Walicki		20.03.2020	0.5
SPRAWDZ.			MATERIAŁ:
ZATWIER.			40HM+QT
WYPROD.			
Z.JAKOŚCI			

NR RYSUNKU	ARKUSZ 5 Z 8
SBT_01_004	A4



CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ: WYMIARY SĄ W MILIMETRACH WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI: ODCHYLEŃKI WYMIARÓW BEZ TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK				SKALA 2:1		Ostre krawędzie ścięcie fazą 0.2 x 45°		NR PROJEKTU Stanowisko badania tkanin	
								TYTUŁ: Wgłębnik R5	
				MASĄ: 0.1				NR RYSUNKU SBT_01_005	
NARYS. M. Walicki				DATA 20.03.2020				A4	
SPRAWDZ. ZATWIER. WYPROD.						MATERIAŁ: 40HM+QT		ARKUSZ 6 Z 8	
Z.JAKOŚCI									



$\varnothing 12,0 f7$
 $\varnothing 12,0 -0,016$
 $\varnothing 12,0 -0,034$

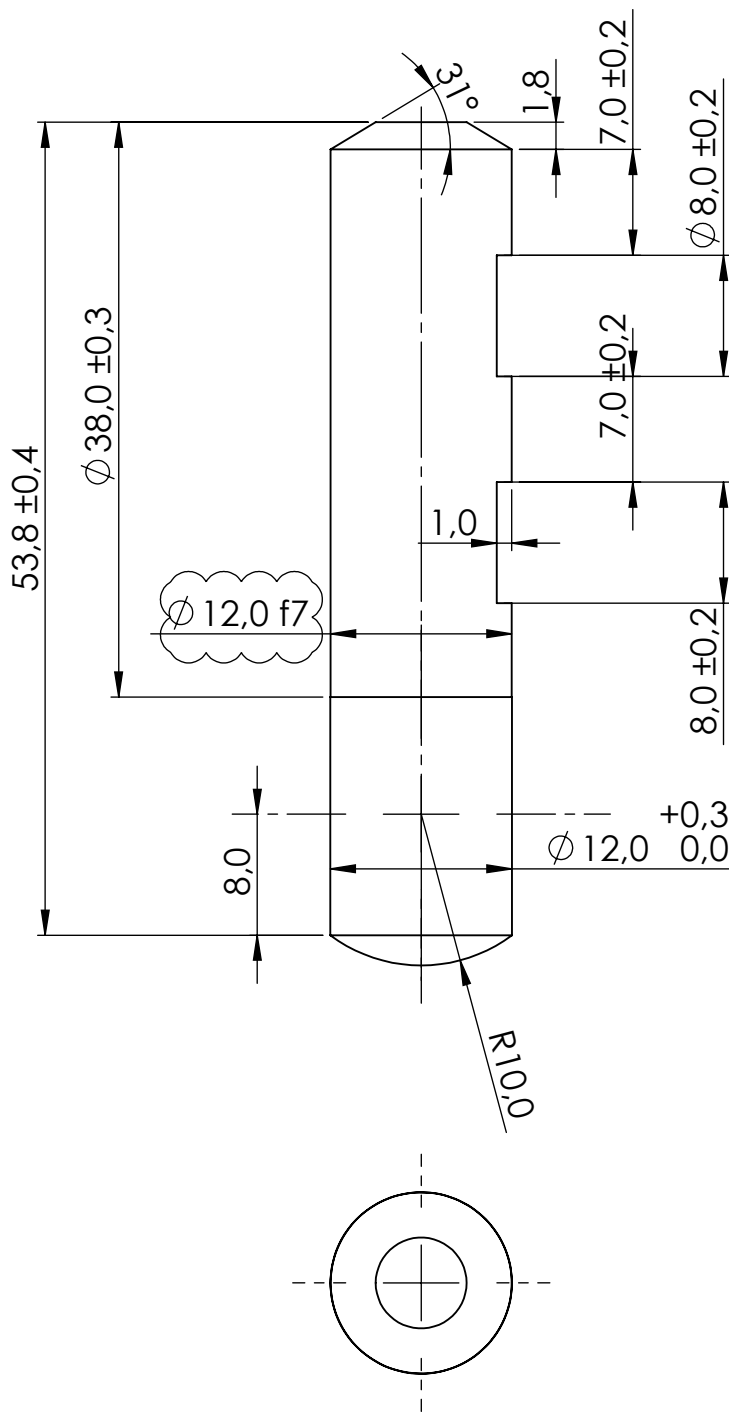
$\varnothing 12,0 f7$

Sztuk:1

CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ: WYMIARY SĄ W MILIMETRACH WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI: ODCHYLEŃKI WYMIARÓW BEZ TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK				SKALA 2:1		Ostre krawędzie stępieć fazą $0,2 \times 45^\circ$		NR PROJEKTU Stanowisko badania tkanin	
								TYTUŁ: Wgłębnik R1	
				MASA: 0.1				NR RYSUNKU SBT_01_006	
NARYS. M. Waliński				DATA 20.03.2020				A4	
SPRAWDZ.				MATERIAŁ: 40HM+QT				ARKUSZ 7 Z 8	
ZATWIER.									
WYPROD.									
Z.JAKOŚCI									

$\varnothing 12,0 f7$

$\varnothing 12,0 -0,016$
 $\varnothing 12,0 -0,034$



Sztuk:1

CHYBA ŻE OKREŚLONO INACZEJ:
WYMIARY SĄ W MILIMETRACH
WYKOŃCZENIE POWIERZCHNI:
ODCHYLEŃKI WYMIARÓW BEZ
TOLERANCJI WG ISO 2768 - mK

SKALA 2:1

Ostre krawędzie
stępić fazą
 $0,2 \times 45^\circ$

NR PROJEKTU

Stanowisko badania tkanin

TYTUŁ:

Wgłębnik R10

	IMIĘ I NAZWISKO	PODPIS	DATA	MASA:
NARYS.	M. Walicki		20.03.2020	0.1
SPRAWDZ.				MATERIAŁ:
ZATWIER.				40HM+QT
WYPROD.				
Z.JAKOŚCI				

NR RYSUNKU

SBT_01_007

A4

ARKUSZ 8 Z 8