

Streszczenie rozprawy doktorskiej

Badania rozwojowe balistycznych wkładów kompozytowych do ochrony personalnej przed pociskami karabinowymi

Doktorat realizowany w trybie wdrożeniowym (studia III stopnia)

Autor: mgr inż. Marek Walicki

Promotor: dr hab. inż. Jacek Janiszewski

Promotor pomocniczy firmy (CFT Precyzja Sp. z o.o.): Andrzej Szpalerski

Tematyka niniejszej dysertacji ściśle powiązana jest z balistyką końcową w zakresie systemów ochrony personalnej. W związku ze specyfiką doktoratu wdrożeniowego, w rozprawie zostały przedstawione wyniki prac mające na celu wykazanie możliwości przygotowania do wdrożenia produkcyjnego w firmie CFT Precyzja Sp. z o.o., kompozytowego wkładu balistycznego do zastosowania w kamizelkach kuloodpornych.

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 ochrony. Ponadto, w pracy zaproponowano technologię wytwarzania lekkich wkładów balistycznych z uwzględnieniem możliwości produkcyjnych firmy CFT Precyzja Sp. z o.o. Przedstawiono również wyniki badań balistycznych różnych konstrukcji wkładów balistycznych, dokumentujące przygotowanie końcowego produktu na poziomie VIII (PGT) gotowości technologicznej. Do oceny zastosowanych materiałów i opracowanych rozwiązań konstrukcyjnych wkładów balistycznych zastosowano przede wszystkim analityczne i doświadczalne metody badawcze.

W ramach przeglądu literatury dokonano analizy 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 z grupy polietylenów (UHMWPE) oraz aramidów, jak i technologie wytwarzania wielowarstwowych materiałów kompozytowych przewidzianych na osłony balistyczne. Przeanalizowano również zagadnienie ochrony balistycznej w kontekście przeżywalności, jak i opisane zostało zjawisko zatrzymania pocisku przez kompozytowe struktury balistyczne.

W zakresie opracowanego studium wykonalności konstrukcji, porównane zostały rozwiązania konkurencyjnych wkładów balistycznych na rynku światowym oraz zdefiniowano wymagania techniczne na podstawie analizy trendu rozwiązań konstrukcyjnych. Poddano

również weryfikacji dostępność technologii produkcyjnych i projektowych firmy, a następnie określone zostały metody spełnienia wymagań i osiągnięcia celów.

Na podstawie wyników analizy literaturowej i analizy trendu konstrukcji sformułowane zostały dwie hipotezy:

- a) Hipoteza wdrożeniowa pracy, mówiąca że w zakładzie CFT Precyzja Sp. z o.o. możliwe jest opracowanie i wytworzenie balistycznych wkładów do ochrony personalnej przed pociskami karabinowymi o parametrach:
- masa wkładu równa bądź niższym 1,6 kg,
 - powierzchnia ochronna 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 nie przekraczającym 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.

Zdefiniowano również dwa cele główne pracy, tj., wdrożeniowy i naukowy:

- Celem wdrożeniowym jest opracowanie, na bazie przyjętych założeń, kompozytowego wkładu balistycznego i zastosowanie jego w pilotażowej partii prototypów.
- Celem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej jest ocena wpływu właściwości fizyko-mechanicznych materiału bazowego (materiałów włóknistych) i procesu technologicznego na właściwości balistyczne kompozytu balistycznego.

Aby osiągnąć ww. cele dokonano wyboru technologii oraz materiałów stosowanych w produkcji osłon balistycznych, jak również przeanalizowano możliwości ich wykorzystania w firmie CFT Precyzja Sp. z o.o. Omówione zostały również metody badawcze oraz zaprezentowano etapy wykonywania próbek materiałowych dla poszczególnych etapów badawczych niniejszej dysertacji. Podstawowe metody eksperymentalne obejmowały badania balistyczne bazujące na normatywnych metodykach wskazanych w normach STANAG 2920, NIJ 0101.06 oraz PN-V-87000. Do oceny właściwości fizyko-mechanicznych tkanin bazowych, przewidzianych do użycia w kompozytach balistycznych wykorzystano autorską metodę porównawczą badań właściwości quasi-statycznych tkanin balistycznych, wykorzystującą specjalnie zaprojektowane stanowisko badawcze.

W wyniku przeprowadzonych badań, na podstawie zestawienia wyników badań balistycznych dla tkanin włóknistych z wartościami energii odkształcenia określonymi w warunkach obciążenia quasi-statycznego, zaobserwowano i oceniono, że nie ma korelacji pomiędzy wynikami otrzymanymi za pomocą ww. technik badawczych. Na tej podstawie stwierdzono, że hipoteza o znalezieniu korelacji pomiędzy cechami balistycznymi a wytrzymałościowymi określonymi w warunkach quasi-statycznego obciążenia tkaniny balistycznej penetratorem, a tym samym o możliwości oceny wpływu właściwości fizyko-mechanicznych materiału bazowego na właściwości balistyczne kompozytu balistycznego, nie została udowodniona, a rezultaty nie dały oczekiwanej zgodności.

W związku z powyższym, dalsze prace rozwojowe wkładu balistycznego polegały na wykorzystaniu materiałów o najwyższych własnościach balistycznych (wysoka wartość parametru V_{50}). Zrealizowane zostały badania balistyczne na wytworzonych konstrukcjach kompozytowych przewidzianych do produkcji lekkich wkładów balistycznych z zachowaniem chronologii procesu konstruowania i rozwoju. Zbadano uproszczone modele, następnie kolejne wersje rozwojowe, a na koniec przeprowadzono badania weryfikacyjne finalnej wersji wkładu balistycznego.

Na podstawie wyników końcowych badań balistycznych udowodniono hipotezę pracy oraz potwierdzono, że opracowany wkład balistyczny, bazujący na rozwiązaniu materiałowym oznaczonym jako Teijin PE, spełnia wszystkie postawione założenia i wymagane parametry.

Zgodnie z formułą „doktoratu wdrożeniowego” na koniec pracy przedstawione zostały także założenia i analiza procesu wdrożenia wkładu balistycznego do produkcji w zależności od oczekiwanej wielkości zapotrzebowania. Przedstawiono cele i ramowy plan wdrożenia. Określony został również schemat produkcyjny oraz proces kontroli jakości z uwzględnieniem analizy zagrożeń i ryzyka metodą SWOT.

Doctoral Dissertation Summary

Developmental research of ballistic composite inserts for personal protection against rifle bullets

Implementation Doctorate Program (3rd- degree studies)

Author: M.Sc. Eng. Marek Walicki

Promoter: D. Eng. Jacek Janiszewski, Professor of Military Technical Academy

Auxiliary Promoter (Supervisor) from the company (CFT Precyzja Sp. z o.o.): Andrzej Szpalerski

The topic of this dissertation is closely related to terminal ballistics in the field of personal protection systems. Due to the specific nature of the implementation doctorate, the dissertation presents the results of work aimed at demonstrating the possibility of preparation for production implementation at CFT Precyzja Sp. z o. o. of a composite ballistic insert for use in bulletproof vests.

This dissertation analyzes the available materials and design solutions of ballistic shields in order to develop a universal ballistic insert for a bulletproof vest with the possibility of its enhancement to higher protective levels. Moreover, the paper proposes a technology to produce light ballistic inserts, taking into account the manufacturing capability of CFT Precyzja Sp. z o. o. The results of ballistic tests of various ballistic inserts designs are also presented, documenting the preparation of the final product at technology readiness level VIII (TRL). To evaluate the materials used and the developed ballistic inserts design solutions, analytical and experimental research methods are primarily used.

As part of the literature review, the issue of personal protection is analyzed, with particular focus on ballistic inserts used in bulletproof vests. The dissertation presents a historical outline, types of ballistic protection levels and their assessment methods, materials from the UHMWPE polyethylene group and aramids group, as well as technologies for producing multi-layer composite materials intended for ballistic protection. The issue of ballistic protection in the context of survivability is also analyzed, and the phenomenon of stopping the bullet by composite ballistic structures described.

In the scope of the feasibility study of the structure, solutions for competitive ballistic inserts available on the global market are compared and technical requirements defined based on the analysis of the construction solutions trend. The availability of the company's

production and design technologies is defined and so are the methods to meet the requirements and achieve the goals.

Based on the results of the literature analysis and the analysis of the structure trend, two hypotheses was formulated:

- a) Implementation hypothesis stating that at CFT Precyzja Sp. z o. o.'s site it is possible to develop and produce ballistic inserts for personal protection against rifle bullets, featuring the following parameters:
 - ballistic insert weight equal to or less than 1.6 kg,
 - protective area of $0.068 \text{ m}^2 \pm 5\%$,
 - level of ballistic protection comparable to NIJ 0101.06 class III or PN-V-87000 class K3C,
 - surface density not exceeding 27 kg/m^2 .
- b) Research hypothesis: "There is a correlation between the results of quasi-static strength tests of fibrous materials (fabrics) and the results of ballistic tests of inserts made of the same base fabrics."

Two main goals of the work were also defined, i.e. an implementation and a scientific one:

- The implementation goal is to design, based on the adopted assumptions, a composite ballistic insert and use it in a pilot batch of prototypes;
- The scientific goal of this doctoral dissertation is to assess the impact of the physical and mechanical properties of the base material (fibrous materials) and the technological process on the ballistic properties of the ballistic composite.

To achieve the above goals, technologies and materials used in the production of ballistic shields were selected, and the possibilities of their use at CFT Precyzja analyzed. Research methods were also discussed and the stages of preparing material samples for individual research stages of this dissertation were presented. The basic experimental methods included ballistic tests based on the normative methodologies indicated in the STANAG 2920, NIJ 0101.06 and PN-V-87000 standards. To assess the physical and mechanical properties of base fabrics intended for use in ballistic composites, an original comparative method for testing the quasi-static properties of ballistic fabrics was applied, using a specially designed test stand.

As a result of the tests carried out, based on the comparison of ballistic test results for fibrous fabrics with the strain energy values determined under quasi-static loading conditions, it was observed and evaluated that there is no correlation between the results obtained using

the above-mentioned research techniques. On this basis, it was concluded that the hypothesis of finding a relationship between the ballistic and strength characteristics determined under the conditions of quasi-static loading of the ballistic fabric with a penetrator, and thus of the possibility of assessing the influence of the physical and mechanical properties of the base material on the ballistic properties of the ballistic composite, has not been proven, and the results did not produce the expected relevance.

Due to the above, further development of the ballistic insert consisted in using materials with the highest ballistic properties (high value of the V_{50} parameter). Ballistic tests were carried out on the manufactured composite structures intended for the production of light ballistic inserts, while maintaining the chronology of the construction and development process. Simplified models were tested, then their subsequent development versions, and lastly verification tests of the final version of the ballistic insert were carried out.

Pursuant to the final results of the ballistic tests, the hypothesis of the doctoral dissertation was evidenced, and it was confirmed that the developed ballistic insert, based on a material solution marked as Teijin PE, meets all the assumptions and required parameters.

In accordance with the concept of the “implementation doctorate”, in the closing chapter of the dissertation, assumptions and process analysis of the ballistic insert production implementation are also presented, parameters varying dependent on the expected demand. The goals and the framework implementation plan are defined. The production scheme and the quality control process are also specified, taking into account the risk & threat analysis via the SWOT method.