

Dr hab. inż. Krzysztof Baszczyński

Centralny Instytut Ochrony Pracy –
Państwowy Instytut Badawczy
Zakład Ochron Osobistych
ul. Wierzbowa 48, 90-133 Łódź

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Macieja Glogera
pt. „Numeryczne i eksperymentalne podejście do problemu
konstrukcji tekstylnych osłon balistycznych ze strukturą
haftowaną”
promotor: dr hab. inż. Zbigniew Stempień, prof. uczelni**

1. Podstawa prawna sporządzenia recenzji

Recenzja została sporządzona w związku z:

- wszczęciem przez Radę ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej w dyscyplinach inżynieria mechaniczna, inżynieria materiałowa postępowania w sprawie o nadanie mgr. inż. Maciejowi Glogerowi stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa,
- powołaniem składu Komisji Doktorskiej Uchwałą 57/7/IIK/2023 Rady ds. Stopni Naukowych z dnia 10 lipca 2023 roku.

2. Cel i zakres rozprawy

Recenzowana rozprawa doktorska mgr. inż. Macieja Glogera poświęcona jest problematyce związanej z tekstylnymi osłonami balistycznymi, do których zalicza się między innymi kamizelki kuloodporne. Sprzęt ten obecnie jest powszechnie używany przez wojsko, organy ścigania i inne służby, co wymusza na nim spełnienie odpowiednich właściwości ochronnych. Autor rozprawy pokazał, że skuteczność ochrony miękkich kamizelek kuloodpornych zależy nie tylko od zastosowanego materiału włókien, ale także od parametrów strukturalnych pakietów balistycznych, takich jak: rodzaj konstrukcji warstwy tekstylnej, masa liniowa i liczności nitek, masa powierzchniowa warstw, liczba warstw w

pakiecie balistycznym, napawanie warstw substancjami z udziałem mikro - i nanocząstek różnych materiałów itp.

Głównym celem pracy było wytworzenie struktur haftowanych z udziałem przędzy para-aramidowej i ocena efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów z udziałem tych struktur po ostrzale pociskiem Parabellum 9x19 mm FMJ. Przyjęto hipotezę badawczą, że istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych. Zakres wykonanych prac obejmował wytworzenie struktur haftowanych z udziałem nitek para-aramidowych, przeprowadzenie symulacji numerycznych i badań eksperymentalnych ostrzału pakietów balistycznych o różnym układzie warstw tkanych i haftowanych, przeprowadzenie numerycznych i eksperymentalnych badań optymalizacyjnych w celu znalezienia najbardziej efektywnej struktury pakietu balistycznego z udziałem tkanin i struktur haftowanych. Dla potrzeb symulacji opracowano modele numeryczne wszystkich wariantów pakietów balistycznych oraz pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ. Symulacje numeryczne uderzenia pocisku w opracowane warianty pakietów w warunkach stałego zamocowania ich na krawędziach oraz ułożenia na znormalizowanym podłożu plastelinowym przeprowadzono za pomocą oprogramowania LS-Dyna (Livermore Software Technology Corporation, USA).

Uzyskane wyniki symulacji weryfikowano za pomocą badań eksperymentalnych przeprowadzonych w Laboratorium Badań Balistycznych na Politechnice Łódzkiej. W badaniach tych wykorzystano:

- stanowisko do badań balistycznych składające się z działa balistycznego do wystrzeliwania pocisków, systemu bramek do pomiaru prędkości uderzenia pocisku oraz kamery do szybkiego obrazowania tylnej strony pakietu balistycznego,
- stanowisko do badań balistycznych składające się z działa balistycznego do wystrzeliwania pocisków Parabellum 9x19, systemu bramek do pomiaru prędkości uderzenia pocisku oraz podłoża plastelinowego zgodnego z zaleceniami amerykańskiej normy NIJ Standard. Deformacja podłoża plastelinowego po ostrzale była mierzona na stanowisku wyposażonym w laserowy czujnik odległości.

Uzyskane wyniki symulacji numerycznych i badań laboratoryjnych poddano porównaniu, które wykazało wystąpienie istotnych różnic. Przeprowadzona analiza wyników badań pozwoliła na ustalenie przyczyn tych różnic.

Analiza uzyskanych wyników badań pozwoliła na wybranie wariantu pakietu o największej efektywności balistycznej. Był to pakiet wykonany w wariacie IV składający się z hybrydowego połączenia 13 warstw tkanych z przodu i 13 warstw struktur haftowanych z tyłu.

W ostatnim etapie prac najbardziej efektywny pakiet wykonany w wariacie IV poddano badaniom w celu znalezienia optymalnej granicy faz tkanej i haftowanej. Badania na kalibrowanym podłożu plastelinowym pokazały, że największą efektywnością cechował się pakiet zawierający 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych. Potwierdziły to zarówno badania symulacyjne, jak i eksperymentalne w warunkach zamocowania pakietu w stalowych ramach oraz badania eksperymentalne w warunkach ułożenia pakietu na kalibrowanym podłożu plastelinowym.

3. Tezy i cele pracy

W pracy została sformułowana następująca teza: „Istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych”.

Określono również następujący cel pracy: „Celem pracy jest wytworzenie struktur haftowanych z udziałem przędzy para-aramidowej i ocena efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów z udziałem tych struktur po ostrzale pociskiem Parabellum 9x19 mm FMJ”.

Dla osiągnięcia celu i udowodnienia tezy zaplanowano realizację następującego zakresu badań:

- wytworzenie struktur haftowanych z udziałem nitki para-aramidowej,
- przeprowadzenie badań numerycznych i eksperymentalnych ostrzału pakietów balistycznych, o różnym układzie warstw tkanych i haftowanych, zamocowanych w stalowych ramach i ułożonych na kalibrowanym podłożu plastelinowym,
- przeprowadzenie numerycznych i eksperymentalnych badań optymalizacyjnych w celu znalezienia najbardziej efektywnej struktury pakietu balistycznego z udziałem tkanin i struktur haftowanych.

W mojej ocenie teza pracy jest sformułowana w sposób jasny i logiczny. Zaplanowany zakres badań laboratoryjnych i symulacji numerycznych jest odpowiedni dla osiągnięcia założonego celu.

4. Analiza treści rozprawy oraz uzyskanych wyników

4.1. Zastosowane metody badawcze

Przedstawione w rozprawie doktorskiej badania efektywności balistycznej pakietów z udziałem para-aramidowych struktur haftowanych przeprowadzono dwoma metodami:

- stosując symulacje numeryczne metodą elementów skończonych za pomocą oprogramowania LS-Dyna,
- eksperymentalnie z wykorzystaniem stanowisk laboratoryjnych do testów balistycznych na Politechnice Łódzkiej.

Przeprowadzenie wstępnych badań dotyczących możliwości wykonania struktur haftowanych, wydajności hafciarki sterowanej numerycznie, oceny mocy obliczeniowej posiadanego sprzętu komputerowego oraz oceny wyposażenia Laboratorium Badań Balistycznych pozwoliło na sformułowanie odpowiednich założeń szczegółowych. Dotyczyły one między innymi:

- konstrukcji i wymiarów struktur haftowanych,
- porównywania efektywności balistycznej uzyskanych struktur haftowanych z efektywnością balistyczną komercyjnie dostępnej tkaniny para-aramidowej Twaron CT709 Microfilament 930 tex f1000 o masie powierzchniowej 200 g/m²,
- realizacji numerycznej i eksperymentalnej badań efektywności balistycznej dla pakietów złożonych z 26 warstw i wykonanych w pięciu wariantach oznaczonych w pracy odpowiednio jako wariant I-V,
- ostrzeliwania pakietów balistycznych w warunkach badań numerycznych i eksperymentalnych pociskiem Parabellum 9x19 mm FMJ z prędkością uderzenia 380 m/s.

W rozdziałach 4.1 i 4.2 rozprawy precyzyjnie przedstawiono technologię wykonania struktur haftowanych przy użyciu hafciarki JCZA 0109-550 wyposażonej w głowicę TFP do układania i przymocowywania struktur liniowych oraz konstrukcję wariantów pakietów balistycznych. Dla potrzeb badań numerycznych opracowano model geometryczny struktury haftowanej oraz, na podstawie danych katalogowych tkaniny Twaron CT709, warstwy tkaniny. Również dla potrzeb badań symulacyjnych, opracowano model numeryczny pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ. Model geometryczny tego pocisku opracowano na podstawie danych fabrycznych.

Badania eksperymentalne prowadzono na dwóch stanowiskach badań balistycznych w laboratorium na Politechnice Łódzkiej. Pierwsze stanowisko składało się z działa balistycznego do wystrzeliwania pocisków, systemu bramek do pomiaru prędkości uderzenia pocisku oraz w kamerę Cordin 550 do obrazowania tylnej strony pakietu balistycznego. Przed ostrzałem badany pakiet balistyczny umieszczano pomiędzy dwoma stalowymi ramami o wymiarach wewnętrznych 20x20 cm, które następnie dociskano do siebie za pomocą ścisków umieszczonych na każdym z boków ram. Podczas ostrzału rejestrowano sekwencję szesnastu obrazów tylnej części pakietu balistycznego za pomocą kamery Cordin 550 z prędkością rejestracji 12800 obrazów/s. Dla zarejestrowanych sekwencji obrazów podczas uderzenia pocisku wyznaczano deformację tylnej strony pakietu balistycznego. Po ostrzale dla każdego wariantu pakietu balistycznego wyznaczano współczynnik perforacji oraz spłaszczenie pocisku.

Eksperymentalne badanie efektywności balistycznej pakietów prowadzono układając je na znormalizowanym podłożu plastelinowym i poddając ostrzałowi pociskiem. W tym celu

do badań przygotowano podłoże plastelinowe zgodnie z zaleceniami amerykańskiej normy Ballistic Resistance of Personal Body Armour NIJ Standard. Pakiet balistyczny przed ostrzałem mocowano na wykalibrowanym podłożu plastelinowym. Ostrzał zamocowanego pakietu przeprowadzono za pomocą pocisku wystrzeliwanego z działa balistycznego. Prędkość pocisku mierzono podczas każdego ostrzału za pomocą bramek usytuowanych w torze pocisku. W celu pomiaru deformacji podłoża plastelinowego po ostrzale, skanowano je na stanowisku wyposażonym w laserowy czujnik odległości, którego położenie w osiach XY sterowano napędami liniowymi z silnikami krokowymi. Pakiety balistyczne po ostrzale poddawano analizie pod kątem liczby przestrzelonych warstw. Na tej podstawie obliczano współczynnik perforacji pakietu balistycznego i ekspansję pocisku. Na szczególną uwagę zasługuje tu metodyka przygotowania podłoża plastelinowego oraz jego kalibracja, która była warunkiem uzyskania wiarygodnych i powtarzalnych wyników badań.

Zaprezentowane w rozprawie metody badawcze wskazują na wysoki poziom techniczny przeprowadzonych badań. Należy uznać, że przygotowana metodyka była odpowiednia dla uzyskania wymaganych wyników badań pakietów balistycznych.

Podsumowując zastosowane metody badawcze oraz ich opis pewien niedosyt budzi brak oszacowania niepewności pomiarów deformacji pakietów balistycznych zarówno za pomocą kamery do szybkiej rejestracji, jak również podłoża plastelinowego. Znajomość takich parametrów, które są uzależnione od samej metody badawczej, jak i parametrów zastosowanej aparatury pomiarowej, ułatwia analizę uzyskanych wyników oraz zwiększa ich wiarygodność.

Z opisu przedstawionego w punkcie 4.4 recenzowanej rozprawy wynika, że dla potrzeb badań laboratoryjnych, w których filmowano ruch pocisku uderzającego w pakiet balistyczny, wykonano po 2 pakiety dla każdego założonego wariantu. Dla potrzeb badań eksperymentalnych efektywności balistycznej pakietów ułożonych na znormalizowanym podłożu plastelinowym i poddanych ostrzałowi pociskiem wykonano po 3 pakiety dla każdego założonego wariantu. Przytoczone tu liczby budzą pewne wątpliwości czy są wystarczające z punktu widzenia minimalnej liczby powtórzeń badań, która gwarantuje ich wiarygodność.

4.2. Wyniki badań numerycznych i eksperymentalnych

Zgodnie z opisem metod badawczych przedstawionym w rozdziale 4 rozprawy doktorskiej przeprowadzono badania numeryczne i eksperymentalne. Do najważniejszych z nich można zaliczyć:

- doświadczalne wyznaczenie wartości parametrów NFLS i SFSL wymaganych do realizacji badań symulacyjnych uderzenia pocisku w pakiety balistyczne zawierające struktury haftowane,
- badania numeryczne pakietów balistycznych w zależności od wariantu ułożenia warstw składowych,
- badania eksperymentalne pakietów balistycznych w zależności od wariantu ułożenia warstw składowych,
- badania efektywności balistycznej pakietów osadzonych na podłożu plastelinowym i poddanych ostrzałowi pociskami Parabellum 9x19 mm FMJ,
- optymalizację pakietu balistycznego wykonanego w wariacie IV.

Uzyskane wyniki badań oraz przedstawiony ich opis świadczą o wysokim poziomie umiejętności badawczych Doktoranta oraz rzetelności wykonanych przez niego prac. Pewne wątpliwości budzą dwie kwestie, które wymagają dodatkowego wyjaśnienia.

Pierwsza dotyczy braku, w opisie przeprowadzonych badań, informacji czy prezentowane w postaci liczbowej i graficznej wyniki to wartości pojedyncze, czy może wartości minimalne lub maksymalne, czy są to wartości uśrednione, a jeśli tak to z jakiej liczby wyników. Informacja taka pozwala na lepszą interpretację rezultatów badań oraz zwiększenie ich wiarygodności.

Druga kwestia dotyczy analizy deformacji poszczególnych wariantów pakietów, która wskazała na znaczące różnice w ich wynikach uzyskanych w badaniach numerycznych i eksperymentalnych. Jako jedną przyczynę różnic w wartościach deformacji uzyskanych w badaniach numerycznych i eksperymentalnych wskazano delikatne zafalowanie nitek obserwowane w strukturach haftowanych. Wyjaśniono, że podczas procesu haftowania nitka para-aramidowa jest naprężana i mocowana jako rozprostowana, jednak podczas zdejmowania struktury haftowanej z maszyny następuje delikatna relaksacja tej struktury, która powoduje zafalowanie nitek. Podczas uderzenia pocisku, zafalowane nitki najpierw ulegają rozprostowaniu a następnie zaczynają przenosić duże naprężenia wynikające z ich rozciągania.

Jako podstawowy powód istotnych różnic wyników deformacji poszczególnych wariantów pakietów uzyskanych w badaniach numerycznych i eksperymentalnych wskazano na wysuwanie się warstw pakietu balistycznego ze stalowych ram podczas uderzenia pocisku, głównie na linii nitek kontaktujących się z czołem pocisku. Wysuwanie, które zaobserwowano za pomocą kamery do szybkiej rejestracji, następowało pomimo silnego docisku systemu mocowania. Wynikało ono z generowania bardzo wysokich naprężeń w nitkach kontaktujących się z czołem pocisku. Starano się ograniczyć to zjawisko do minimum, jednak nie znaleziono praktycznych rozwiązań, aby całkowicie wyeliminować wysuwanie się warstw z ram stalowych. Występowanie tego zjawiska nie

wydaje się niczym zaskakującym i nie ma istotnego znaczenia dla interpretacji uzyskanych wyników, lecz pod jednym warunkiem. Warunkiem tym jest podobieństwo, z punktu widzenia ilościowego, wysuwania się wszystkich analizowanych wariantów pakietów balistycznych. Stwierdzenie tego podobieństwa upoważnia dopiero do porównania właściwości rozważanych wariantów pakietów. W recenzowanej rozprawie doktorskiej nie ma informacji na ten temat, w związku z czym wymaga to dodatkowego wyjaśnienia.

4.3. Wykorzystana literatura

Doktorant wykorzystał w swojej pracy 110 naukowych pozycji bibliograficznych. Pozycje te pochodzą z lat 1955-2022. Biorąc pod uwagę ten bardzo szeroki okres można prześledzić rozwój dziedziny, której dotyczy recenzowana rozprawa doktorska. W ostatnich dziesięciu latach powstały 33 cytowane pozycje bibliograficzne, a w ostatnich pięciu latach 13 pozycji. Pod względem jakościowym literatura jest dobrana prawidłowo. Niestety w przygotowaniu spisu literatury oraz jej cytowań wkładły się błędy. Pierwszy z nich polega na tym, że pozycja nr 100 Literatury „Barauskas, R. & Abraitiene, A. Computational analysis of impact of a bullet against the multilayer fabrics in LS-DYNA. Int. J. Impact Eng. 34, 1286–1305 (2007)” nie została nigdzie zacytowana w tekście rozprawy.

Mocną stroną badań naukowych prezentowanych w rozprawie doktorskiej jest zastosowanie nowoczesnego oprogramowania komputerowego. Oprogramowanie to jest stosowane między innymi do symulacji numerycznych procesów, jakie zachodzą podczas uderzenia pocisku w pakiety balistyczne, wizualizacji wyników pomiarów, tworzenia wirtualnego projektu struktury haftowanej, tworzenia modelu geometrycznego pocisku itp. Do oprogramowania tego należą między innymi: LS-Dyna, Origin, GiS BasePack version 10, Ansys ICEM CFD, Geomagic Design X, Visual Basic. Niestety informacja o tym oprogramowaniu nie została zaopatrzona w odniesienia do literatury np. w postaci linków do głównych stron ich producentów. W związku z tym, potrzeba pogłębienia informacji np. o zastosowanej wersji oprogramowania wymaga od czytelnika rozprawy samodzielnych poszukiwań.

Podsumowując można uznać, że pod względem jakościowym literatura jest dobrana prawidłowo i wspiera prezentowane w rozprawie rozważania teoretyczne, prace eksperymentalne i symulacje numeryczne. Na podkreślenie zasługuje również wykorzystanie literatury i odwołujące się do najnowszych badań światowych w podjętej tematyce tekstylnych osłon balistycznych.

4.4. Ocena redakcyjna rozprawy i strony językowej

Rozprawa doktorska od strony językowej i edycyjnej została przygotowana starannie. Jej układ redakcyjny nie budzi zastrzeżeń. Zastosowany język jest poprawny z właściwym

słownictwem specjalistycznym. Zamieszczone rysunki, zdjęcia i wykresy są dobrej jakości umożliwiającą ich odczytanie i zrozumienie.

W ocenianej rozprawie, podobnie jak w innych tego typu pracach o analogicznej objętości, znalazły się również usterki, które nie umniejszają jej wartości merytorycznej. Jednym z zauważonych mankamentów jest stosowanie w całym tekście rozprawy oddzielania ułamków dziesiętnych od liczb całkowitych kropką. Zgodnie z publikacją Adama Wolańskiego pt. *Edycja tekstów. Praktyczny poradnik*, PWN 2008 w miejscu tym, zgodnie z zasadami języka polskiego, powinien być zastosowany przecinek.

Opierając się na tym samym poradniku, można wskazać kolejną nieprawidłowość, którą jest pozostawianie na końcach wierszy jednoliterowych spójników i przyimków.

Ponadto w tekście rozprawy zauważono również inne drobne usterki, które przedstawiono poniżej:

- niekonsekwentny sposób wyrównywania tekstu w „Spisie treści”,
- rys. 1: brak wyjaśnienia oznaczeń warstw pakietu balistycznego,
- str. 7: jest „własności reologicznych” powinno być „właściwości reologicznych”,
- rys. 6: brak wyjaśnienia oznaczeń pod rysunkiem,
- str. 15: jest „nitki staja się” powinno być „nitki stają się”,
- rys. 18: brak oznaczeń,
- rys. 19: jest „plot” powinno być „splot”,
- rys. 28: brak wyjaśnienia oznaczeń pod rysunkiem,
- rys. 32: zastosowanie skrótu myślowego „Widok modelu numerycznego”
- rys. 42 i 43: brak wyjaśnienia oznaczeń pod rysunkami,
- str. 37: jest „Badania numeryczne były realizowano [...]” powinno być „Badania numeryczne realizowano [...]”,
- str. 43: jest „ Dalsza kontynuacja [...]” powinno być „Kontynuacja [...]”,
- rys. 58 i 59 zawierają dane w formie tabelarycznej i powinny być potraktowane w tekście jako tabele,
- rys. 60: jest „ [...] przez każda z warstw [...]” powinno być „ [...] przez każdą z warstw [...]”,
- str. 61: jest „Obrazy widoków poprzecznych [...]” powinno być „Widoki poprzeczne [...]” lub „Przekroje poprzeczne [...]”,
- str. 71: jest „Wartość tą [...]” powinno być „Wartość tę [...]”,
- rys. 113 został podzielony i umieszczony na dwóch stronach, co utrudnia analizę przedstawionych na nim wykresów,
- str. 114: jest „[...] ostrzału [...]” powinno być „[...] ostrzału [...]”.

5. Wnioski końcowe

Rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Macieja Glogera reprezentuje wysoki poziom merytoryczny w zakresie problematyki związanej z wielowarstwowymi tekstylnymi pakietami balistycznymi zawierającymi struktury haftowane. Taka ocena dotyczy zarówno wytworzenia odpowiednich struktur włókienniczych, jak i symulacji numerycznych zjawisk towarzyszących uderzeniu pocisku w pakiety balistyczne oraz badań laboratoryjnych. Oceniana rozprawa świadczy o bardzo dobrej znajomości Autora problematyki pracy, jak i warsztatu badawczego. Stanowi ona istotny wkład w dziedzinę nauki zajmującej się tekstylnymi osłonami balistycznymi, do których zalicza się między innymi kamizelki kuloodporne. Autor, poprzez przedstawioną rozprawę doktorską udowodnił swoje predyspozycje do samodzielnej pracy naukowej, krytycznej analizy i logicznego wnioskowania.

W świetle niniejszej oceny, uwag i wniosków końcowych stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji praca doktorska Pana mgr. inż. Macieja Glogera pod tytułem: „Numeryczne i eksperymentalne podejście do problemu konstrukcji tekstylnych osłon balistycznych ze strukturą haftowaną” w pełni spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim, zawarte w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnoszę zatem o przyjęcie przedłożonej rozprawy i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

