

Streszczenie pracy doktorskiej:

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

Maciej Gloger

Tekstylne osłony balistyczne, do których zalicza się kamizelki kuloodporne, są powszechnie używane przez personel wojskowy, organy ścigania, a także przez osoby cywilne wykonujące zawody wysokiego ryzyka, takie jak personel ochrony lub osoby udzielające pierwszej pomocy. Skuteczność ochronna miękkich kamizelek kuloodpornych zależy nie tylko od przyjętego materiału włókien, ale także od różnych parametrów strukturalnych pakietów balistycznych, takich jak: rodzaj konstrukcji warstwy tekstylnej (tkanina dwuosiowa i trójosiowa, włóknina, dzianina 2D/3D), masa liniowa i liczności nitek, masa powierzchniowa warstw, liczba warstw w pakiecie balistycznym, hybrydowa orientacja warstw w pakiecie balistycznym, napawanie warstw substancjami z udziałem mikro- i nanocząstek różnych materiałów, które stosowane w różnych kombinacjach prowadzą do uzyskania odpowiedzi strukturalnej, sprzyjającej zwiększonej efektywności balistycznej kamizelek kuloodpornych.

Celem badań w ramach realizacji pracy doktorskiej 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 FMJ. Założono hipotezę badawczą do udowodnienia, że istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych. Zakres badań obejmował wytworzenie struktur haftowanych z udziałem nitek para-aramidowych, przeprowadzenie badań numerycznych i 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.

W ramach realizacji badań wytworzono struktury haftowane o wymiarach 20 cm x 20 cm za pomocą techniki haftu TFP (Tailored Fibre Placement) poprzez przymocowanie do włókniny polipropylenowej dwóch układów nitek obróconych względem siebie o 90°, z których każdy składał się z równoległe ułożonych i rozprostowanych przędz para-aramidowych Twaron Microfilament 930 tex fl1000. Przędze para-aramidowe były mocowane za pomocą nici hafciarskich o małej masie liniowej. Opracowane struktury haftowane i tkaniny para-aramidowe Twaron CT709 złożono w pakiety balistyczne w pięciu wariantach. Wariant I składał się z 26 warstw wykonanych ze struktur haftowanych, Wariant II – z naprzemiennie ułożonych 13 warstw tkanin i 13 warstw struktur haftowanych, Wariant III – z 13 warstw struktur haftowanych z przodu od strony uderzenia pocisku i 13 warstw tkaniny z tyłu, Wariant IV – z 13 warstw tkaniny z przodu od strony uderzenia pocisku i 13 warstw struktur haftowanych z tyłu i Wariant V – z 26 warstw tkaniny. Założenie wykonania pakietów balistycznych w Wariantach I i V wynikało z konieczności bezpośredniego porównania efektywności balistycznej pakietów złożonych w całości ze struktur haftowanych i tkanin. Z kolei założenie wykonania pakietów w Wariantach III i IV, złożonych z 13 warstw struktur haftowanych i 13 warstw tkanin wynikało z konieczności zbadania, czy kolejność ułożenia tych warstw względem punktu uderzenia pocisku ma wpływ na efektywność balistyczną pakietów. W przypadku pakietu wykonanego w Wariacie II, w którym warstwy tkanin i struktury haftowane były ułożone naprzemiennie założono, że w przypadku uzyskania korzystnych własności balistycznych, można rozważyć zlikwidowanie włókniny jako podłoża struktury haftowanej i jej wykonanie bezpośrednio na tkaninie para-aramidowej, co pozwoliłoby na ograniczenie masy powierzchniowej pakietu balistycznego.

W kolejnym etapie badań opracowano modele numeryczne wszystkich wariantów pakietów balistycznych oraz pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ i dalej, za pomocą oprogramowania LS-Dyna,

proawdzono badania symulacyjne uderzenia pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ w opracowane warianty pakietów w warunkach stałego zamocowania ich na krawędziach oraz ułożenia na znormalizowanym podłożu plastelinowym. Przed przystąpieniem do obliczeń zdefiniowano modele materiałowe i przyjęto odpowiednie parametry tych modeli. Prędkość uderzenia pocisku wynosiła 380 m/s. Wyniki badań numerycznych weryfikowano za pomocą badań eksperymentalnych w Laboratorium Badań Balistycznych na Politechnice Łódzkiej. Stanowisko do badań balistycznych składało się z działa balistycznego UPB1 (Fabryka Broni Łucznik Radom, Polska) do wystrzeliwania pocisków Parabellum 9x19, systemu bramek do pomiaru prędkości uderzenia pocisku oraz w kamerę Cordin 550 (Cordin, USA) do obrazowania tylnej strony pakietu balistycznego. Przed ostrzałem badany pakiet balistyczny umieszczano pomiędzy dwoma stalowymi ramami o wymiarach wewnętrznych 20x20 cm, które następnie dociskano do siebie za pomocą ośmiu ścisków umieszczonych po dwa na każdym z boków ram. Podczas ostrzału rejestrowano sekwencję szesnastu obrazów tylnej części pakietu balistycznego za pomocą kamery Cordin 550 z prędkością rejestracji 12800 obrazów/s. Drugim badaniem eksperymentalnym któremu były poddane warianty pakietów balistycznych było badanie efektywności balistycznej na znormalizowanym podłożu plastelinowym i poddanych ostrzałowi pociskiem Parabellum 9x19 FMJ. Do badań przygotowano podłoże plastelinowe zgodnie z zaleceniami amerykańskiej normy NIJ Standard. W celu pomiaru deformacji podłoża plastelinowego po ostrzale, skanowano je na stanowisku wyposażonym w laserowy czujnik odległości. Pakiety balistyczne po ostrzale poddawano również analizie pod kątem liczby przestrzelonych warstw. Na tej podstawie obliczano współczynnik perforacji pakietu balistycznego. Obliczano również ekspansję pocisku.

Przeprowadzone badania ostrzału pakietów zamocowanych w ramach stalowych pokazały, że w warunkach badań eksperymentalnych występuje efekt częściowego wysuwania się warstw pakietu z ram stalowych, co nie występuje w warunkach badań numerycznych z uwagi uwężone węzły, a co znacząco wpływa na odpowiedź balistyczną pakietu. Efekt ten jest znany i opisywany w literaturze i pomimo dołożenia wszelkich starań w metodyce badań, nie udało się go całkowicie wyeliminować. Wysuwanie się warstw znacząco zwiększa maksymalną deformację poprzeczną pakietu balistycznego, powoduje zatrzymanie pocisku w dłuższym czasie i formowanie się stożka odkształcenia na większej powierzchni w danej chwili czasowej niż wynika to z badań symulacyjnych. Z tego względu wyniki badań symulacyjnych i eksperymentalnych podczas badań pakietów zamocowanych w ramach stalowych porównywano w aspekcie efektywności balistycznej poszczególnych wariantów pakietów balistycznych. Jako wskaźniki efektywności brano pod uwagę maksymalną deformację poprzeczną pakietu, czas zatrzymania pocisku, równoznaczny z osiągnięciem zerowej energii kinetycznej pocisku, współczynnik perforacji oraz ekspansję pocisku. Biorąc pod uwagę te wskaźniki należy stwierdzić, że pomiędzy badaniami symulacyjnymi i eksperymentalnymi wystąpiła pełna zgodność. W obu tych badaniach największą efektywność balistyczną osiągnął pakiet wykonany w Wariancie IV składający się z hybrydowego połączenia 13 warstw tkanych z przodu i 13 warstw struktur haftowanych z tyłu. Z kolei najmniejszą efektywność balistyczną wykazał pakiet wykonany w Wariancie III o odwrotnym połączeniu warstw w stosunku do Wariantu IV. Stwierdzono, że struktury haftowane pod względem odpowiedzi na udar balistyczny mają dwie zalety i jedną wadę. Zaletami są rozprostowane nitki i brak przepłotów sprzyjający dużej prędkości propagacji, co korzystnie wpływa na mniejszą deformację poprzeczną pakietu. Wadą tych struktur jest rozsuwanie się nitek w kontakcie z czołem pocisku, co niekorzystnie wpływa na liczbę przestrzelonych warstw w pakiecie balistycznym. Należy zaznaczyć, że intensywność rozsuwania się nitek zależy od kąta powierzchni stożkowej napierającej na strukturę haftowaną. W przypadku wielowarstwowego pakietu balistycznego, rozsuwanie się nitek w kolejnych warstwach będzie mniejsze a w warstwach końcowych w ogóle może nie występować. Struktury tkane pod względem odpowiedzi na udar balistyczny mają z kolei zalety i wady, które są przeciwieństwem zalet i wad struktur haftowanych. Zaletą jest tutaj zakleszczona przez przepłoty nitek wątku i osnowy struktura, która zapobiega rozsuwaniu się nitek w kontakcie z czołem pocisku. Z kolei wadami tej struktury są wrobienia nitek wątku i osnowy oraz mniejsza prędkość propagacji fali naprężeń z uwagi na przeplatana strukturę, co sprzyja zwiększonej deformacji poprzecznej. Przeprowadzane badania

wykazały, że aby wykorzystać zalety obu struktur i jednocześnie ograniczyć ich wady, konieczne jest złożenie wielowarstwowego hybrydowego pakietu, który z przodu zawiera struktury tkane a tyłu struktury haftowane. Biorąc to pod uwagę, w ostatnim etapie badań najbardziej efektywny pakiet wykonany w Wariancie IV poddano optymalizacji w celu znalezienia optymalnej granicy faz tkanej i haftowanej. W pakiecie wykonanym według Wariantu IV, granica tych faz była w środku pomiędzy 13 i 14 warstwą. Badania na kalibrowanym podłożu plastelinowym pokazały, że największą efektywnością cechuje się pakiet zawierający 9 warstw tkanych i 17 warstw haftowanych. Potwierdziły to zarówno badania symulacyjne jak i eksperymentalne w warunkach zamocowania pakietu w ramach stalowych oraz badania eksperymentalne w warunkach ułożenia pakietu na kalibrowanym podłożu plastelinowym.

Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne efektywności balistycznej pakietów balistycznych z udziałem struktur haftowanych pozwoliły na udowodnienie tezy pracy, że istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych.