

Łódź, dn. 20.08.2023 roku

Prof. dr hab. inż. Marcin Henryk Struszczyk

prof. nadzw. ITB „MORATEX”

Instytut Technologii Bezpieczeństwa „MORATEX”

Ul. M. Curie-Skłodowskiej 3

90-505 Łódź

RECENZJA

pracy doktorskiej

Pana mgr inż. Macieja Glogera

o tytule: *Numeryczne i eksperymentalne podejście do problemu konstrukcji tekstylnych osłon balistycznych ze strukturą haftowaną*

wykonanej w Instytucie Architektury Tekstyliów, na Wydziale Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów Politechniki Łódzkiej

pod kierunkiem:

- dr hab. inż. Zbigniewa Stempnia, profesora uczelni – promotor pracy,
- dr inż. Justyny Pinkos – promotora pomocniczego.

PODSTAWA NINIEJSZEJ RECENZJI

Niniejszą recenzję rozprawy doktorskiej przygotowałem na podstawie uchwały 57/7/IIK/2023 Rady ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej z dnia 10 lipca 2023 roku, przywołanej w piśmie Pani Barbary Błażejczak-Okolewskiej, Przewodniczącej Rady ds. Stopni Naukowej z dnia 11 lipca 2023 roku

Wraz z ww. pismem dostarczono rozprawę doktorską Pana mgr inż. Macieja Glogera o tytule: *Numeryczne i eksperymentalne podejście do problemu konstrukcji tekstylnych osłon balistycznych ze strukturą haftowaną* wykonanej w Instytucie Architektury Tekstyliów Politechniki Łódzkiej pod kierunkiem dr hab. inż. Zbigniewa Stempnia, profesora uczelni (promotor pracy) oraz dr inż. Justyny Pinkos (promotora pomocniczego).

UWAGI OGÓLNE

Zgodnie z art. 187 ust. 3 i 4 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* [Dz.U. 2023 poz. 742, 1088, 1234] do oceny przedstawiono, jako rozprawę doktorską, pracę pisemną wraz ze streszczeniami w języku polskim oraz angielskim.

Recenzowana rozprawa doktorska liczy 123 strony, składa się z 8 głównych rozdziałów numerowanych, w tym rozdział odnośników bibliograficznych, przywołanych w pracy w liczbie 110, w znacznej większości stanowiących publikacje naukowe w czasopismach naukowych o zasięgu międzynarodowym. Są to aktualne publikacje (biorąc pod uwagę niszowość opisanego w rozprawie problemu naukowego) z lat 2010 – 2022.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska została przygotowana w sposób standardowy, zawierając szerokie omówienia stanu techniki w przedmiocie założonej tezy naukowej, rozszerzonej o wiedzę dotyczącą rodzajów materiałów włókienniczych oraz układów materiałowych stosowanych w projektowaniu miękkich osłon tułowia.

Główny problem badawczy zdefiniowany w pracy stanowi umiejętne i skuteczne zaprojektowanie włókienniczych struktur haftowanych celem zwiększenia skuteczności ochronnej balistycznych układów materiałowych, co stanowi istotną nowość w zakresie opracowania nowoczesnych osłon balistycznych wytworzonych z tekstyliów.

Obszar badań ujęty w rozprawie ma charakter badań interdyscyplinarnych wiążąc inżynierię materiałową z badaniami numerycznymi i skupiającymi się na zaprojektowaniu i wytworzeniu struktur haftowanych oraz, następnie, realizacją badań numerycznych ostrzału zaprojektowanych układów materiałowych z różnym udziałem tekstyliów tkanych oraz haftowanych, przeprowadzeniu eksperymentalnych badań balistycznych tożsamyh układów materiałowych w różnych warunkach prowadzenia testów balistycznych i, końcowo, realizację optymalizacji układów balistycznych, zarówno bazując na wynikach testów symulacyjnych, jak i w środowisku laboratoryjnym, w warunkach rzeczywistych, celem opracowania układu materiałowego o optymalnych właściwościach balistycznych.

Praca kończy się umiejętnie przeprowadzoną analizą i dyskusją wyników pozyskanych z badań numerycznych i następnie eksperymentalnych oraz, co istotne, w sposób skondensowany opracowanymi wnioskami końcowymi, odnoszącymi się do postawionej tezy i celu zrealizowanych przez Autora badań o silnie aplikacyjnym charakterze.

ANALIZA STANU TECHNIKI

Analiza state-of-the-art stanowi prawie połowę zawartości rozprawy doktorskiej, co wydaje się zbyt obszerne i szczegółowe w konotacji do części eksperymentalnej. Autor omówił w niej, jak wspominałem powyżej, w sposób szczegółowy:

- rodzaje włókien oraz struktur włókienniczych (z włączeniem struktur włókienniczych, które nie są praktycznie stosowane do wytwarzania komercyjnych osłon balistycznych) stosowanych do projektowania balistycznych osłon ciała,
- różnorodne metodyki badawcze, zwłaszcza nienormatywne, służące do weryfikacji odporności balistycznej osłon włókienniczych,
- zjawiska związane z absorpcją energii uderzenia pocisku w różnego typu balistyczne, włókiennicze układy materiałowe,
- techniki optymalizacji odporności balistycznej poprzez hybrydyzacje układu materiałowego lub/i jego przeszycie.

Należy zauważyć, że przedstawione w ww. analizie tekstylna wytworzone z nitek Zylon® nie są od dawna stosowane praktycznie, ze względu na wysoką podatność na degradację w czasie użytkowania (wpływ wilgoci oraz promieniowania UV), co spowodowało wycofanie ich stosowania w projektowaniu balistycznych wyrobów ochronnych na początku XXI wieku. Należy także wskazać, że przedstawiony na rysunku 39 schemat produkcji nietkanego układu Dyneema® HB 26 dotyczy surowca stosowanego do produkcji balistycznych kompozytów,

a nie balistycznych wkładów miękkich. Także użycie w tym przypadku terminu „laminat” dalekie jest od poprawności, ze względu na specyficzną omawianego rozwiązania materiałowego. W terminologii polskiej przyjęto nazwę „wyrób nietkany”.

Powyższe uwagi nie obniżają jakości oraz obszerności analizy stanu techniki przedstawionej w pracy przez Autora.

Sposób rozeznania stanu techniki, zwłaszcza w zakresie doboru oraz metodologii analizowanych publikacji naukowych, charakteryzuje się dojrzałością naukową oraz stoi na wystarczającym poziomie w odniesieniu do tezy pracy. W analizie zabrakło, niestety, przeglądu praw własności przemysłowej. Obok aspektu naukowego powinien być także uwzględniony aspekt aplikacyjny oraz wykazanie jak badania realizowane w analizowanych publikacjach naukowych odnoszą do praktycznych rozwiązań stosowanych w osłonach balistycznych.

Jako walor pracy należy wskazać *Podsumowanie przeglądu literatury*, które wskazuje na brak struktur haftowanych w konstrukcjach osłon balistycznych oraz identyfikuje nakierowanie się w procesie badawczym na układy hybrydowe, które pozwalają na istotną optymalizację efektywności balistycznej. Powyższe stanowi podstawę do zdefiniowania tezy naukowej pracy oraz celu realizacji badań naukowych.

Logicznie i wartościowo przeprowadzona state-of-the-art potwierdza wiedzę teoretyczną Doktoranta w obszarze projektowania balistycznych struktur włókienniczych i weryfikacji osłon balistycznych prowadząc do wniosków zgodnych z aktualnym stanem wiedzy.

TEZA I CEL PRACY

Teza naukowa pracy o brzmieniu: *„Istnieje możliwość zwiększenia efektywności balistycznej wielowarstwowych tekstylnych pakietów balistycznych poprzez zastosowanie w tych pakietach struktur haftowanych”* została ogólnie poprawnie zdefiniowana i ma

bezpośrednie odniesienie do przeprowadzonej uprzednio analizy stanu techniki. Warto jednak zwrócić uwagę, że w tezie pracy nie ujęto aspektu hybrydyzacji stosowanej w projektowaniu układów materiałowych oraz jej powiązania z aspektem optymalizacji skuteczności balistycznej.

Dodatkowo, ujęcie w tezie oczekiwanych parametrów odporności balistycznej (prędkość pocisku, rodzaj pocisku) efektywnie pozwoliłoby na weryfikację tezy przedstawionej do recenzji pracy.

Jako cel pracy, Doktorant wskazał zaprojektowanie struktur haftowanych z udziałem przędzy para-aramidowej oraz ocenę odporności balistycznej opracowanych układów materiałowych. Należy zwrócić jednak uwagę, że samo wykonanie badań odporności balistycznej nie powinno być ujęte jako cel prac, ponieważ stanowi etap potwierdzający osiągnięcie założonego celu, czyli zaprojektowanie układów balistycznych o ściśle założonych parametrach, w szczególności odporności balistycznej.

CZĘŚĆ EKSPERYMENTALNA

Część eksperymentalna pracy zawiera, ujęte w odrębnych rozdziałach, trzy etapy badań, podane poniżej w kolejności chronologicznej:

- 1) zaprojektowanie struktur haftowanych z udziałem ściśle zdefiniowanej przędzy p-aramidowej,
- 2) weryfikacja właściwości balistycznych, opracowanych włókienniczych układów materiałowych, w tym zawierających układy hybrydowe w warunkach symulowanych oraz rzeczywistych, w różnych środowiskach testów,

- 3) optymalizacja zaprojektowanych układów materiałowych, w tym układów hybrydowych w oparciu o wyniki balistycznych badań symulacyjnych (numerycznych) oraz testów w warunkach rzeczywistych.

W ramach badań, prowadzonych w etapach 2 i 3, Autor przeprowadził badania numeryczne, które zostały następnie zwalidowane w rzeczywistych warunkach laboratoryjnych. Powyższe badania zostały poprzedzone szczegółowo opisanym programem badawczym opisującym metody projektowania i wytworzenia balistycznych układów materiałowych, ich weryfikacji w warunkach testów rzeczywistych i numerycznych oraz końcowo, ich optymalizacji biorąc pod uwagę aspekt funkcjonalności oraz bezpieczeństwa.

Należy wskazać, jako istotny walor pracy, umiejętne zdefiniowanie wstępnych założeń do badań numerycznych i rzeczywistych w zakresie kryteriów doboru przędz, substratu do formowania struktur haftowanych, materiałów odniesienia oraz metodologii projektowania i wytworzenia układów hybrydowych, jak także kryteriów ich optymalizacji.

Jednakże wchodząc w szczegóły zapisów ww. założeń, pojawiły się istotne pytania związane z jakościowaniem tychże:

- na jakiej podstawie wybrano do badań układy materiałowe składające się z 26 warstw tekstylnych ?
- dlaczego do badań balistycznych zastosowano układy o rozmiarach 20 cm x 20 cm ?

W pierwszym etapie badań Autor zaprojektował, a następnie wykonał typoszeregi struktur haftowanych. Sposób projektowania wyżej wspomnianych struktur został dobrze i głęboko przemyślany - także w zakresie odniesienia do materiału kontrolnego (tkaniny p-aramidowej) ze względu na zastosowaną w obydwu przypadkach identyczną dla układu haftowanego i tkanego przędzę, co pozwoliło na bezpośrednie porównanie struktur (opracowanych oraz odnośnikowej). Podobnie Autor dobrał eksperymentalnie masę liniową przędzy aby masy powierzchniowe układów były jak najbardziej zbliżone.

Następnie Doktorant zamodelował układy materiałowe, składające się w całości ze struktur haftowanych oraz będących hybrydami struktur haftowanych oraz tkanin, w warunkach symulowanych wraz z opracowaniem numerycznym modelu pocisku Parabellum 9x19 mm FMJ.

Badania balistyczne w warunkach rzeczywistych były prowadzone dwójako:

- 1) próbę badano w formie zakleszczonej pomiędzy dwoma stalowymi ramionami oraz
- 2) zastosowano jako podłoże plastelinę balistyczną celem zasymulowania obecności ciała ludzkiego.

W obydwu przypadkach, jako penetrator, zastosowano pocisk Parabellum 9x19 mm FMJ, co pozwoliło na zwalidowanie badań numerycznych.

Doktorant zauważył i przedyskutował, w przypadku badań realizowanych na próbach zakleszczonych w ramie, efekt wykleszczania się próbek w czasie testu, co negatywnie wpłynęło na wiarygodność odczytywanej deformacji układu materiałowego.

Moim zdaniem badania eksperymentalne w modelu z podłożem balistycznym były już wystarczające do potwierdzenia założonej w pracy tezy naukowej, a wprowadzenie dodatkowych testów w modelu zakleszczania próbek w ramie miały jedynie walor addytywny, ponieważ warunki prowadzonych badań nie odzwierciedlają w tym modelu warunków rzeczywistych i nie pozwalają na ocenę maksymalnej, dynamicznej deformacji badanego układu materiałowego.

Należy podkreślić, że Autor bardzo szczegółowo i profesjonalnie podszedł do przygotowania warunków testów rzeczywistych, łącznie z zastosowaną procedurą przygotowania i weryfikacji podłoża balistycznego oraz liczności prób, co stanowi istotny walor Jego warsztatu naukowego. Jako wskaźniki efektywności przyjął cztery parametry: maksymalną deformację, czas zatrzymania pocisku, współczynnik perforacji oraz ekspansję (penetrację) pocisku.

Dla każdego z prowadzonych testów układów materiałowych, na zakleszczonej ramie oraz na podłożu balistycznym, Doktorant najpierw wykonał badania numeryczne, a następnie zwalidował otrzymane wyniki w ramach rzeczywistych badań eksperymentalnych. W przypadku pierwszym wystąpiły istotne różnice między wynikami badań numerycznych a eksperymentalnych w warunkach rzeczywistych, co jak prawidłowo ocenił Autor, było wynikiem wykleszczania się próbek z ramy w momencie penetracji pocisku. W przypadku badań na podłożu balistycznym wyniki uzyskane z badań symulacyjnych oraz testów rzeczywistych były porównywalne.

Na uwagę zasługują bardzo obszerna dyskusja wpływu struktury prób (haftowanej/tkanej) oraz sposobu ułożenia poszczególnych struktur wobec siebie na otrzymane wyniki badań, co pozwala na potwierdzenie ugruntowanej wiedzy i warsztatu Doktoranta wraz z Jego elastycznością w zakresie wiązania faktów naukowych z różnych dyscyplin naukowych i rozsądnego oraz prawidłowego wiązania ich ze sobą.

Autor prawidłowo wnioskował na podstawie zrealizowanych przez siebie badań, że opracowane przez Niego struktury haftowane niosą ze sobą zarówno walory, jak i wady, tzn.: korzyścią jest mniejsza niż w przypadku struktur tkanych deformacja układu materiałowego, wynikająca z możliwości prostowania się przędz oraz braku w strukturze przeplotów. Wadą zaś jest większa niż w przypadku układów tkanych podatność na penetrację, co wynika z rozsuwania się nitki w punkcie kontaktu z pociskiem. Wniosek ten wypływa z obydwu testów przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych. Z ww. powodów struktury haftowane powinno się stosować w układach hybrydowych z ułożeniem w tyle pakietu balistycznego.

W ostatnim etapie badań Autor zoptymalizował opracowane hybrydowe układy materiałowe pod kątem maksymalizacji skuteczności ochrony balistycznej, biorąc pod uwagę przyjęte założenia w zakresie wskaźników efektywności balistycznej. Pierwotnie przeprowadził symulacje numeryczne, a następnie zwalidował otrzymane wyniki w testach rzeczywistych. Jako wynik końcowej optymalizacji uzyskano optymalny układ materiałowy składający się z 7 warstw tkanych oraz 19 warstw haftowanych.

Doktorant pozwala sobie czasem na wprowadzenie określeń bardziej popularno-naukowych, jak np. w zadaniu na stronie 89, cytuję: „Z tego prawdopodobnie wynika niesamowita efektywność balistyczna pakietu wykonanego w takim układzie hybrydowym.”

Na stronie 114 Autor używa terminu „faza” w kontekście układu hybrydowego z układem tkaninowym oraz haftowanym. Poprawnie należało by zastosować, jak podano wyżej, termin „układ”.

Należy także zwrócić uwagę na brak w pracy informacji, czy prezentowane wyniki badań eksperymentalnych, prowadzonych w warunkach rzeczywistych, stanowią wartość średnią (w odniesieniu do informacji podanej w metodyce, że testowano trzy próby dla każdego wariantu materiałowego).

Powyższe nie wpływa istotnie na moją wysoką ocenę procesu analitycznego oraz udokumentowanie kompetencji w zakresie projektowanie oraz wykonania znacząco interdyscyplinarnych badań.

Prowadzone przez Autora badania o wybitnie aplikacyjnym charakterze, wygenerowały nowe obszary wiedzy w zakresie dyscypliny naukowej: inżynieria materiałowa, obejmujących technologie włókienniczych ochron balistycznych tułowia, w tym w szczególności:

- zaprojektowanie nowatorskich rozwiązań w zakresie haftowanych materiałów balistycznych wraz ze zwalidowaniem ich właściwości w warunkach symulacji numerycznych oraz w warunkach rzeczywistych testów balistycznych,
- opis zjawisk zachodzących w czasie penetracji nowo opracowanych struktur haftowanych w szczególności w układzie hybrydowym ze strukturami tkanymi,
- zaprojektowanie narzędzi badawczych do weryfikacji właściwości nowo opracowanych struktur haftowanych oraz hybrydowych układów materiałowych, w skład których wchodzi struktury haftowane;

- dotyczące danych numerycznych związanych z przeniesieniem do środowiska numerycznego struktur haftowanych oraz hybrydowych układów materiałowych ze strukturami haftowanymi.

Doktorant w sposób przejrzysty oraz wskazujący na dojrzałość naukową oraz posiadanie profesjonalnego warsztatu naukowego przeprowadził w ramach swojej rozprawy proces analityczny skupiony bezpośrednio na udokumentowaniu wyników badań numerycznych oraz rzeczywistych postawionej tezy naukowej. Należy wskazać także na wszechstronność prowadzonych analiz oraz ich interdyscyplinarność, łatwość łączenia faktów naukowych oraz prawidłowość interpretacji.

Autor poprawnie zdefiniował problem badawczy wynikający z analizy stanu techniki, na bazie którego udokumentował tezę oraz cel pracy. Następnie poprawnie zdefiniował program badawczy, który addytywnie wypełnił cel oraz potwierdził postawioną tezę naukową. Dyskusja wyników badań, opis zjawisk zachodzących w czasie penetracji pociskiem nowo opracowanych układów materiałowych, ich interpretacja oraz wnioskowanie pozwala na potwierdzenie dojrzałego warsztatu naukowego Doktoranta.

Wygenerowany w ramach przeprowadzonych przez Autora badań zasób interdyscyplinarnej wiedzy oraz umiejętności naukowych powinien zostać podkreślony jako istotny, niwelując uwagi krytyczne oraz potknięcia edytorskie i terminologiczne.

WNIOSKI KOŃCOWE

Podsumowując, należy wskazać, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Macieja Glogera o tytule: *Numeryczne i eksperymentalne podejście do problemu konstrukcji tekstylnych osłon balistycznych ze strukturą haftowaną*, spełnia kryteria stawiane przepisami art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* [Dz.U. 2023 poz. 742, 1088, 1234] w stosunku do kandydatów w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora, w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych, dyscyplinie inżynieria materiałowa.

W szczególności przedstawia i potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dyscyplinie przywołanej powyżej oraz umiejętność samodzielnej realizacji prac naukowych.

Przedmiotem rozprawy jest oryginalne, z punktu widzenia aktualnego stanu techniki, rozwiązanie problemu naukowego – opracowanie nowych rozwiązań balistycznych, ocenę wpływu nowo opracowanych struktur włókienniczych na efekt związany z absorpcją energii uderzenia pocisku oraz optymalizację konstrukcji hybrydowych układów materiałowych zgodnie z kryteriami determinującym bezpieczeństwo balistycznych osłon ciała.

Na powyższej podstawie wnioskuje o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.