

Otgonsuren Sukhbat

## Shaping the physiological comfort performance of multilayer clothing assemblies for firefighters

### Streszczenie

#### Kształtowanie efektywności w zakresie komfortu fizjologicznego wielowarstwowych pakietów odzieżowych dla strażaków

Celem pracy jest stworzenie podstaw teoretycznych umożliwiających kształtowanie właściwości biofizycznych wielowarstwowych pakietów odzieżowych przeznaczonych na odzież dla strażaków. Celem użytkowym badań jest poprawa komfortu termofizjologicznego strażaków podczas użytkowania odzieży ochronnej.

Teza pracy jest następująca:

**Poprzez odpowiedni dobór materiałów zestawu wielowarstwowego złożonego z odzieży ochronnej dla strażaków oraz bielizny istnieje możliwość kształtowania właściwości ubioru, wpływających na komfort termo-fizjologiczny strażaków podczas ich pracy w odzieży ochronnej.**

Cel ten został osiągnięty poprzez analizę właściwości termoizolacyjnych - oporu cieplnego i absorpcyjności cieplnej, a także transportu pary wodnej i płynnej wilgoci materiałów włókienniczych mających zastosowanie w odzieży dla strażaków:

- wielowarstwowych pakietów materiałów przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaków,
- dzianin przeznaczonych na bieliznę dla strażaków,
- zestawów wielowarstwowych złożonych z wielowarstwowych pakietów materiałów oraz dzianin przeznaczonych na bieliznę,

a następnie analizę wpływu liczby i konfiguracji warstw na efektywność zapewnienia komfortu termofizjologicznego utworzonych pakietów wielowarstwowych.

W ramach pracy dokonano przeglądu stanu wiedzy w zakresie tematyki pracy na podstawie przeglądu literatury naukowej. Przegląd obejmował zagadnienia warunków

pracy i zagrożeń występujących w środowisku pracy strażaków, struktury i właściwości odzieży ochronnej dla strażaków oraz właściwości biofizycznych materiałów włókienniczych i odzieży. Na podstawie przeglądu literatury stwierdzono, że badania odzieży ochronnej dla strażaków są przedmiotem licznych publikacji, przede wszystkim w zakresie właściwości barierowych materiałów i odzieży, zgodnie z obowiązującymi normami. Stwierdzono ponadto, że bardzo ważne dla zapewnienia sprawności działania strażaka są również właściwości biofizyczne odzieży ochronnej dla strażaków. Dotychczasowe badania właściwości wpływające na komfort termofizjologiczny, mimo że też liczne, nie obejmowały zagadnień transportu potu w postaci płynnej. Stwierdzono również, że nie ma szczególnych wymagań dotyczących bielizny dla strażaka. Jest to istotna luka biorąc pod uwagę fakt, że bielizna jest warstwą przyskórną ubioru strażaka w akcji.

W części teoretycznej przeprowadzono rozważania transportu ciepła i płynnej wilgoci przez wielowarstwowe zestawy materiałów włókienniczych. Sformułowano uogólnione równania opisujące opór cieplny odzieży wielowarstwowej w trakcie użytkowania oraz transport płynnej wilgoci przez wielowarstwowe materiały włókiennicze.

Część badawcza rozprawy doktorskiej obejmuje:

- badania pakietów wielowarstwowych, dzianin oraz zestawów złożonych z pakietów wielowarstwowych i dzianin, w zakresie:
  - właściwości termoizolacyjnych (opór cieplny, absorpcyjność cieplna),
  - oporu pary wodnej i przepuszczalności pary wodnej ,
  - transportu płynnej wilgoci,
- analizę statystyczną wyników badań w celu oceny wpływu liczby warstw i rodzaju materiałów tworzących warstwy na właściwości biofizyczne zestawów złożonych z pakietów wielowarstwowych i dzianin bieliźnianych,
- zastosowanie koncepcji Generalnego Wskaźnika Jakości do skwantyfikowania jakości zestawów złożonych z wielowarstwowych pakietów odzieżowych oraz dzianin bieliźnianych.

Ogółem przebadano:

- 4 pakiety wielowarstwowe stosowane w odzieży ochronnej dla strażaków, złożone z warstwy wierzchniej, warstwy środkowej stanowiącej barierę dla

- wilgoci oraz warstwy wewnętrznej termoizolacyjnej wraz z podszewką,
- 7 wariantów dzianin przeznaczonych na bieliznę dla strażaków, w tym innowacyjną dzianinę wykonaną w technologii TransDry® oraz dzianinę specjalistyczną niepalną przeznaczoną na koszulki dla strażaków,
  - 28 zestawów wielowarstwowych utworzonych poprzez zestawienie 4 pakietów wielowarstwowych i 7 dzianin bieliznianych.

W badaniach zastosowano następujące przyrządy: Alambeta, Permetest, Moisture Management Tester M290, MMT Fabric Stretch Fixture.

Analizę statystyczną uzyskanych wyników badań przeprowadzono z zastosowaniem narzędzi statystycznych dostępnych w programie TBIC Statistica, Wersja 13.3: dwuczynnikowa analiza wariancji (ANOVA) oraz nieparametryczny test Kruskala-Wallisa.

Badania właściwości termoizolacyjnych analizowanych materiałów włókienniczych i zestawów materiałowych wykonano za pomocą przyrządu Alambeta. Uzyskane wyniki wykazały, że rodzaj wariantu wielowarstwowego pakietu materiałów przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaków wpływa na wartości parametrów ciepłochronności: absorpcyjności i oporu cieplnego w sposób statystycznie istotny na poziomie istotności 0,05. Opór termiczny zestawów wielowarstwowych jest skorelowany z ich grubością. Właściwości termoizolacyjne dzianin na bieliznę różnią się również między sobą w zależności od wariantu dzianiny. Wpływ wariantu dzianiny na wartości właściwości termoizolacyjne jest istotny statystycznie przy poziomie istotności statystycznej 0,05. Istnieje również statystycznie istotna korelacja między odpornością termiczną a grubością analizowanych dzianin.

Tworzone na podstawie wielowarstwowych pakietów materiałów na odzież ochronną dla strażaków i dzianin wielowarstwowych układy odzieżowe charakteryzują się różnymi właściwościami termoizolacyjnymi w zależności od wariantu zestawienia. Analiza statystyczna potwierdziła, że zarówno rodzaj wielowarstwowego zestawu materiałów, jak i rodzaj dzianiny istotnie wpływają na właściwości termoizolacyjne utworzonych zestawów na poziomie istotności 0,05. W przypadku oporu cieplnego interakcja między obiema zmiennymi niezależnymi jest również istotna statystycznie. Uzyskane wyniki częściowo potwierdziły rozważania teoretyczne dotyczące oporu

ciepłnego bariery wielowarstwowej tekstylnej. Istnieją jednak pewne odstępstwa od założeń teoretycznych. W większości przypadków zmierzony opór cieplny wielowarstwowych zestawów tekstylnych jest mniejszy niż obliczony jako suma oporów termicznych pakietu wielowarstwowego i dzianiny. Jest to zgodne z wcześniej opublikowanymi pracami badawczymi i wynika z chropowatości powierzchni materiałów tekstylnych oraz ich elastyczności. Powoduje to, że powierzchnia styku między warstwami, przez którą następuje przepływ ciepła, może być większa od nominalnej powierzchni warstw przylegających.

Badania materiałów w zakresie przepuszczalności pary wodnej przeprowadzono za pomocą przyrządu Permetest. Podobnie jak w przypadku właściwości termoizolacyjnych, badaniom przepuszczalności pary wodnej i oporu pary wodnej poddano wielowarstwowe pakiety odzieżowe przeznaczone na odzież ochronną dla strażaków oraz dzianiny przewidziane do zastosowania w bieliznie. Z powodu awarii przyrządu Permetest nie udało się przeprowadzić pomiarów zestawów odzieżowych złożonych z wielowarstwowych pakietów odzieżowych oraz bielizny.

Na podstawie uzyskanych wyników przepuszczalności pary wodnej analizowanych materiałów stwierdzono, że wielowarstwowe pakiety włókiennicze przeznaczone na odzież ochronną dla strażaków charakteryzują się bardzo dużym oporem przenikania pary wodnej (28,5 – 117,5 mKm<sup>2</sup>/W) oraz bardzo niską względną przepuszczalnością pary wodnej w zakresie 7,6 – 21,5%. Oznacza to, że nie są w stanie skutecznie odprowadzać potu z przestrzeni bielizny na zewnątrz. Zwłaszcza transport potu nie będzie efektywny, gdy akcji gaśniczej lub innym akcjom ratowniczym towarzyszy intensywny wysiłek i stres.

Główną barierą dla transportu potu w postaci pary wodnej jest warstwa środkowa kompletów – bariera dla wilgoci. Warstwy wewnętrzne badanych zestawów wielowarstwowych – bariery termiczne połączone z podszewką, zazwyczaj poprzez pikowanie, charakteryzują się znacznie wyższą względną przepuszczalnością pary wodnej. Dzięki temu pot w postaci pary pozostaje częściowo wewnątrz struktury odzieży i częściowo skrapla się na skórze strażaka.

Biorąc to pod uwagę, należy również przeanalizować zdolność tkanin i pakietów materiałów przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaka w zakresie ich zdolności do odprowadzania potu w postaci cieczy.

Odzież ochronna dla strażaków jest noszona razem z bielizną. Bielizna jest najbliższą skórzą warstwą stroju ochronnego strażaka. Dzięki temu bielizna stanowi pierwszą barierę dla potu wytwarzanego przez organizm. W ramach niniejszej pracy wykonano badania względnej przepuszczalności pary wodnej oraz oporu pary wodnej 7 asortymentów dzianin, które mogą być zastosowane w T-shirtach dla strażaków. Badania wykazały, że wszystkie analizowane dzianiny charakteryzują się bardzo dobrą względną przepuszczalnością pary wodnej w zakresie od 60,1 % do 71,5 % oraz niskim oporem pary wodnej w przedziale: 2,6 – 4,0 mKm<sup>2</sup>/W.

Przy doborze materiałów do kompletu ubioru ochronnego dla strażaka należy wziąć pod uwagę interakcję między właściwościami bielizny i odzieży. Niestety, ze względu na awarię Permetestu nie było możliwości wykonania pomiarów przepuszczalności pary wodnej zestawów tekstylnych składających się z wielowarstwowych pakietów odzieżowych oraz dzianin możliwych do zastosowania w bieliźnie dla strażaków. Podjęto zatem decyzję, że w dalszych badaniach opór pary wodnej wielowarstwowych zestawów odzieżowych zawierających pakiety wielowarstwowe i dzianiny zostanie przybliżony na podstawie wyników uzyskanych dla pakietów i dla dzianin.

Badania transportu płynnej wilgoci wykonano za pomocą przyrządu Moisture Management Tester MMT M290. Badaniom poddano wszystkie materiały włókiennicze i zestawy materiałów włókienniczych będące obiektem analiz w ramach dysertacji. W przypadku wielowarstwowych pakietów odzieżowych wykonano badania dla całych pakietów oraz osobno dla warstwy wewnętrznej, a następnie warstwy środkowej, która stanowi barierę dla płynnej wilgoci. Dzianiny badano w stanie swobodnym oraz rozciągniętym przy rozciągu 15 %. Do przygotowania próbek o określonym procencie rozciągnięcia zastosowano przyrząd MMT Stretch Fabric Fixture.

Każdy wariant wielowarstwowych pakietów odzieżowych przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaków oraz każdy wariant dzianin na bieliznę prezentowały różniące się między sobą wyniki w zakresie właściwości transportu płynnej wilgoci.

Nie zaobserwowano zawilgocenia cieczy na zewnętrznej warstwie pakietów wielowarstwowych na odzież strażacką. Transport wilgoci w postaci cieczy zaobserwowano jedynie w wewnętrznej warstwie pakietu. Płynna wilgoć pozostaje w wewnętrznej warstwie pakietu i gromadzi się podczas użytkowania odzieży. Najwyższa wartość parametru OMMC (Overall Moisture Management Capacity)

wystąpiła dla warstwy wewnętrznej wariantu SS4 (0,21), najniższa (0,01) – dla warstwy wewnętrznej wariantu SS2.

W przypadku dzianin na białinę transport wilgoci płynnej był różny w zależności od indywidualnych właściwości dzianiny. Według wartości parametru OMMC dzianiny uszeregowano od najlepszej do najgorszej w następującej kolejności: KF5, KF4, KF1, KF6, KF2, KF3, KF7.

Stwierdzono, że rozciągliwość dzianin białinowych ma istotny wpływ na właściwości transportu wilgoci płynnej. Piętnastoprocentowy rozciąg spowodował poprawę zdolności do transportu płynnej wilgoci, jednakże właściwości transportu płynnej wilgoci zmieniły się w różny sposób dla każdej dzianiny. Największą poprawę wykazano dla dzianin KF2 (OMMC = 0,27 → 0,72) i KF3 (OMMC = 0,18 → 0,50). Można wytłumaczyć to w ten sposób, że podczas rozciągania dzianiny zmienia się jej struktura geometryczna i zwiększa się odległość między przędzami, co poprawia jej właściwości transportu wilgoci.

Stwierdzono, że zarówno wariant wielowarstwowych pakietów odzieżowych, jak i wariant dzianiny zastosowane w utworzonych wielowarstwowych zestawach odzieżowych miały statystycznie istotny wpływ na właściwości transportu wilgoci płynnej zestawu, a między tymi dwoma czynnikami zachodzą statystycznie istotne interakcje.

Najlepszymi właściwościami transportu płynnej wilgoci spośród utworzonych wielowarstwowych zestawów odzieżowych charakteryzują się zestawy: SS4+KF4 (OMMC = 0,6305), SS3+KF5 (OMMC = 0,6201), SS4+KF2 (OMMC = 0,6197). Najniższą wartość OMMC odnotowano dla zestawów: SS1+KF3 (0,0000), SS1+KF6 (0,0000), SS2+KF6 (0,000), SS3+KF6 (0,0000), SS4+KF6 (0,0000). Różnica między wariantami o najwyższej i najniższej wartości parametru OMMC w grupie utworzonych zestawów wielowarstwowych odzieży wyniosła 0,6.

Uzyskane wyniki pokazały, że poprzez optymalny dobór elementów składowych kompletów odzieży strażaka można znacząco poprawić właściwości transportu wilgoci przez ubiór, a tym samym poprawić bezpieczeństwo i komfort pracy strażaka.

Ocena utworzonych wielowarstwowych zestawów odzieżowych dla strażaków została przeprowadzona z zastosowaniem formuły Generalnego Wskaźnika Jakości (*General*

*Quality Index – GQI*). Jest to wskaźnik liczbowy reprezentujący ogólną wartość produktu w aspekcie jego jakości. Zastosowana metoda stanowi sposób wielokryterialnej oceny jakości produktu. Istnieją różne formuły wskaźników jakości. Ogólnie rzecz biorąc, ogólne wskaźniki jakości charakteryzują jakość materiałów lub przedmiotów z punktu widzenia określonej grupy cech.

W prezentowanej pracy w pierwszym etapie oceny Generalny Wskaźnik Jakości został określony wzorem:

$$G = \sum_{i=1}^n r_i$$

gdzie:

$r_i$  – ranga  $i$ -tego parametru tkaniny uwzględnionego w ocenie,

$n$  – liczba parametrów uwzględnionych w ocenie.

W celu obliczenia wartości Generalnego Wskaźnika Jakości wzięto pod uwagę następujące właściwości związane z komfortem:

- opór termiczny,
- opór pary wodnej,
- OMMC.

W drugim etapie oceny zaproponowano względny Generalny Wskaźnik Jakości, którego wartość mieści się w przedziale od 0 do 1. Takie podejście ułatwia interpretację wartości Generalnego Wskaźnika Jakości i ocenę materiałów poddanych badaniu.

Zaproponowano następujące uogólnione równanie względnego Generalnego Wskaźnika Jakości:

$$GQI_{rel} = \frac{\sum_{i=1}^n r_i}{n \cdot m}$$

gdzie:

$r_i$  – ranga wg  $i$ -tej właściwości uwzględnianej w ocenie

$n$  – liczba właściwości (parametrów) uwzględnianych w ocenie,

$m$  – liczba ocenianych materiałów.

Dla analizowanej grupy wielowarstwowych zestawów odzieżowych najwyższą jakość z punktu widzenia komfortu fizjologicznego stwierdzono dla zestawów: SS4+KF4 i SS4+KF1.

Zaskoczeniem była niska ocena pakietów utworzonych z udziałem dzianiny KF6, ponieważ dzianina KF6 została wyprodukowana przy użyciu specjalnej opatentowanej technologii mającej na celu poprawę właściwości komfortu dzianin bawełnianych.

Badania wykazały, że idea Generalnego Wskaźnika Jakości może być z powodzeniem stosowana do porównywania i oceny jakości pakietów materiałów włókienniczych i zestawów odzieżowych przeznaczonych na odzież ochronną dla strażaków. Pozwoli na optymalne projektowanie i wytwarzanie odzieży dla strażaków z punktu widzenia zapewnienia im komfortu użytkowania i poprawy bezpieczeństwa pracy.

Na podstawie przeprowadzonych rozważań teoretycznych oraz badań eksperymentalnych stwierdzono, że

- Spośród ocenianych właściwości związanych z komfortem termofizjologicznym, właściwości termoizolacyjne, transport pary wodnej i płynnej wilgoci są głównymi właściwościami, które w pełni mogą wyrażać komfort użytkowania odzieży.
- Aparatura stosowana do pomiarów parametrów właściwości komfortu termofizjologicznego użytkowania materiałów odzieżowych i odzieży była zaawansowana i nowatorska, współpracująca ze specjalistycznym oprogramowaniem umożliwiającym wyznaczenie wszystkich istotnych parametrów.
- Udowodniono, że optymalny i odpowiedni dobór materiałów do zastosowania w odzieży ochronnej dla strażaków może znacząco poprawić komfort i właściwości ochronne odzieży oraz poprawić bezpieczeństwo i komfort pracy strażaka noszącego odzież ochronną, co jest istotne z punktu widzenia efektywności działania strażaka w trakcie akcji pożarnej i ratunkowej.
- Ocena jakości wielowarstwowych pakietów odzieżowych za pomocą Generalnego Wskaźnika Jakości (GQI) opiera się na teoretycznie opracowanej metodzie, a w przyszłości możliwa jest ocena jakości innych ubrań tą metodą.



- Rozprawa może służyć jako przewodnik dla osób prowadzących badania nad oceną jakości odzieży i właściwościami komfortu użytkowania odzieży.
- W wyniku przeprowadzonych badań wykazano, że poprzez odpowiedni dobór materiałów tworzących poszczególne warstwy odzieży ochronnej dla strażaków można kształtować komfort użytkowania kompletu odzieży strażackiej.