

dr hab. inż. Tomasz S. Wiśniewski
Politechnika Warszawska

dr inż. Henryk Polakowski
Wojskowa Akademia Techniczna

Badania właściwości radiacyjnych materiałów ochron osobistych

Streszczenie

Właściwości radiacyjne materiałów ochron osobistych strażaków mają kluczowe znaczenie dla ich skuteczności w ochronie przed skutkami promieniowania ciepłego. Zasadniczym parametrem decydującym o właściwościach termoizolacyjnych tych ochron, dla wszystkich powierzchni jest emisyjność, zaś dla materiałów transparentnych dla promieniowania ciepłego, także ich przepuszczalność. W niniejszym artykule zaprezentowano sposób wykonania pomiarów emisyjności i przepuszczalności (transmitancji) materiałów ochron osobistych strażaków, takich jak ubrania specjalne i buty. Przedstawiono i przedyskutowano wyniki badań wykonanych dla nowych zestawów tkanin ubraniowych i dla pakietów poddanych działaniu różnych źródeł ciepła.

Słowa kluczowe: ochrony osobiste, promieniowanie ciepłe, emisyjność, transmisyjność

The Study on Radiative Properties of Personal Protective Clothing Materials

Abstract

The radiative properties of personal protective clothing materials for firefighters are crucial to their effectiveness in protecting against the effects of thermal radiation. The main factor determining thermal insulation properties for all surfaces of protective materials is emissivity, and for materials transparent for thermal radiation, also their transmittance. Measurement methods for emissivity and transmittance of personal protective clothing materials for firefighters, such as special garments and boots are presented in this paper. The results of research carried out for new

sets of materials and for packages of fabrics exposed to different sources of heat are presented and discussed.

Key words: personal protective clothing, thermal radiation, emissivity, transmittance

1. WPROWADZENIE

Podczas akcji gaśniczych strażak narażony jest na działanie znacznych strumieni ciepła i wysokich temperatur. Wymiana ciepła z otoczeniem następuje na drodze promieniowania, konwekcji, jak też przewodzenia podczas kontaktu z ciałami o podwyższonej temperaturze. Badania normowe ochron osobistych pod kątem ich skuteczności i odporności na czynniki termiczne przewidują m.in. poddanie ich działaniu promieniowania termicznego, oddziaływaniu płomienia oraz kontaktowi z ciałem o podwyższonej temperaturze. Nieodpowiednia ochrona termiczna ratownika może spowodować obniżenie jego sprawności psychomotorycznej, zmęczenie, oparzenia, a w skrajnych przypadkach zagrożenie życia. Wysoka temperatura otaczających źródeł promieniowania wywołuje duże strumienie ciepła, które stwarzają zagrożenie nie tylko dla strażaka, ale również powodują degradację mechanicznych i cieplnych właściwości ochron osobistych.

O ile bezpośredni kontakt ratownika z płomieniem lub ciałami o wysokiej temperaturze może być sporadyczny, to promieniowanie ciepłe, o różnym natężeniu, stanowi praktycznie ciągle źródło zagrożenia w trakcie akcji gaśniczej. Wielkość radiacyjnego strumienia ciepła, który jest absorbowany przez powierzchnie ochron (ubranie, hełm, obuwie, rękawice), oraz który dociera do ciała strażaka, zależy przede wszystkim od ich właściwości radiacyjnych, tj. emisyjności i przepuszczalności promieniowania cieplnego. Należy zaznaczyć, że w przypadku pakietów tkanin (zestawów komponentów) ubraniowych ważne są właściwości radiacyjne wszystkich warstw. Ich niska emisyjność pozwala na uzyskanie efektu ekranów [10] i znaczące zmniejszenie strumienia ciepła docierającego do powierzchni ciała poprzez promieniowanie.

Znaczenie właściwości radiacyjnych ochron osobistych jest stosunkowo rzadko poruszane w literaturze naukowej. Przeważnie badane i analizowane są ubrania ochronne stosowane w przemyśle [1, 2, 3, 7, 8, 9], a radykalnym sposobem na zmniejszenie emisyjności ich powierzchni jest nałożenie odbijającej

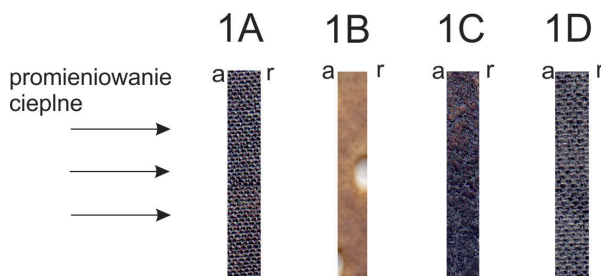
promieniowanie warstwy aluminium na zewnętrznej tkaninie. Najczęściej badany jest wpływ umiarkowanych strumieni promieniowania cieplnego na komfort cieplny użytkowników oraz skutki oddziaływania promieniowania w zakresie ultrafioletu i widzialnym na właściwości mechaniczne pakietów tkanin ubraniowych. Ścisłe właściwościom radiacyjnym materiałów przeznaczonych do produkcji strażackich ubrań specjalnych poświęcone są dwie prace [2, 8].

2. BADANIA WŁAŚCIWOŚCI RADIACYJNYCH

2.1. Zakres badań

Przedmiotem badań było 7 pakietów (zestawów) tkanin z ubrań specjalnych produkowanych w Polsce, złożonych z 2, 3 lub 4 warstw; warstwy zewnętrznej, membrany, warstwy termoizolacyjnej, podszewki. W przypadku pakietu 3-warstwowego nie ma w nim osobnej warstwy termoizolacji. W pakiecie 2-warstwowym warstwa termoizolacyjna jest zintegrowana z podszewką.

Dla potrzeb identyfikacji pakiety ponumerowano liczbami od 1 do 7. Przy znakowaniu próbek zastosowano następującą konwencję: kolejne tkaniny w pakiecie np. oznaczonym liczbą 1 i składającym się z trzech tkanin oznakowano A, B, C. Przyjęto zasadę, że wierzchnią stronę każdej z tkanin wyróżniono naklejką składającą się z liczby i litery np. 1A, które identyfikują tkaninę A z pakietu numer 1 (rys. 1). Ponieważ badania widm emisyjności wykonywano oddzielnie dla każdej powierzchni tkaniny, opisano je dodatkowo literą „a” lub „r” dla dodatkowego wyróżnienia. Wierzchnią (przednią), czyli stronę zawierającą naklejkę oznaczano „a” (awers), wewnętrzną (tylną) stronę każdej z tkanin oznaczono literą „r” (rewers).



Rys. 1. Zasada oznakowanie tkanin w pakiecie składającym się z czterech warstw

2.2. Metodyka pomiaru widm emisyjnych powierzchni tkanin

Pomiary emisyjności (w funkcji długości fali) dla wszystkich warstw pakietów materiałów przeprowadzono metodą pośrednią, to znaczy na podstawie pomiaru refleksyjności, czyli widmowego współczynnika odbicia $\rho(\lambda, T)$ [5], a następnie dokonywano obliczeń z zależności pomiędzy widmowym współczynnikiem emisyjności powierzchni $\varepsilon(\lambda, T)$, a widmowym współczynnikiem odbicia $\rho(\lambda, T)$, zakładając, że ośrodek jest całkowicie nieprzepuszczalny, tj. $\tau(\lambda, T) = 0$,

$$\varepsilon(\lambda, T) = a(\lambda, T) = 1 - \rho(\lambda, T) - \tau(\lambda, T), \quad (1)$$

gdzie $a(\lambda, T)$ jest widmowym współczynnikiem absorpcji.

Ze względu na dyfuzyjny charakter badanych powierzchni, pomiary wykonane zostały przy użyciu spektrometru *Lambda 900* firmy Perkin Elmer, wyposażonego w 150 mm sferę integracyjną PELA 1001, umożliwiającą pomiar refleksyjności rozproszonej.

Wartości refleksyjności były mierzone w zakresie spektralnym 350–2500 nm. Każdorazowo podczas wykonywania pomiarów, w celu sprawdzenia poprawności otrzymywanych wyników, dokonywano pomiaru refleksyjności dla materiałów o wartości odbicia promieniowania 0% oraz 100%. Pomiary te służyły jako dane do korekcji metody.

W zakresie dalszej podczerwieni to jest, od 2 μm do 20 μm pomiar widmowych charakterystyk współczynnika odbicia wykonano na spektrometrze *FT-IR System Spectrum GX* firmy Perkin Elmer.

Pomiar polegał na rejestracji widm refleksyjności próbek, będących zależnością współczynnika odbicia $\rho(\lambda, T)$ wyrażoną w % od długości fali λ podanej w μm . Ze względu na nieco inną cechę pomiarową polegającą na tym, że daje on pomiar widma w kierunku odbicia zwierciadlanego, najwyższą dokładność pomiaru uzyskuje się przy badaniu powierzchni wypolerowanych lub powierzchni gładkich. Wprawdzie rozproszenie wiązki pomiarowej powoduje spadek amplitudy sygnału, ale odwzorowuje cechy widmowego rozkładu współczynnika odbicia.

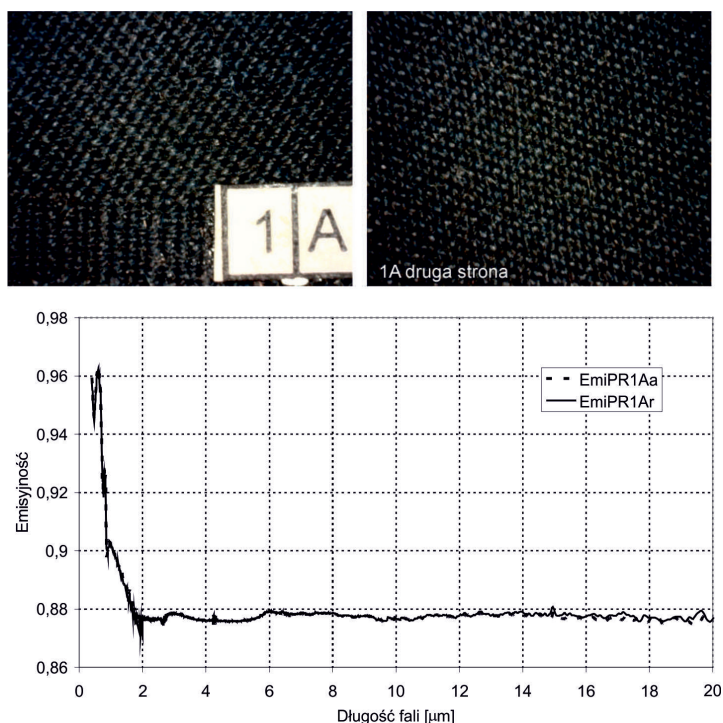
Właściwość ta umożliwiła odtworzenie widma w bardzo szerokim zakresie, niemierzalnym na jednym przyrządzie. Odtworzenie widma w zakresie 350 nm do 20 μm , polegało na korekcji amplitudy widma odbicia otrzymanego ze spektrometru *FT-IR System Spectrum GX* i połączeniu go z widmem ze spektrometru *Lambda*. Współczynnik korekcji amplitudy wyznaczono korzystając z faktu, że

w zakresie od 1000 nm do 2500 nm widma pomiarowe obu przyrządów pokrywają się. Zszytka widm dokonano przy długości fali 2000 nm. Ta długość fali dla obu przyrządów pomiarowych jest optymalna, ponieważ jest dostatecznie oddalona od krańca zakresu pomiarowego każdego z widm. W pobliżu krańców zakresów pomiarowych wskazania obu przyrządów są bardzo zaszumiane, ze względu na mniejszą amplitudę sygnału wiązek pomiarowych.

3. WYNIKI BADAŃ

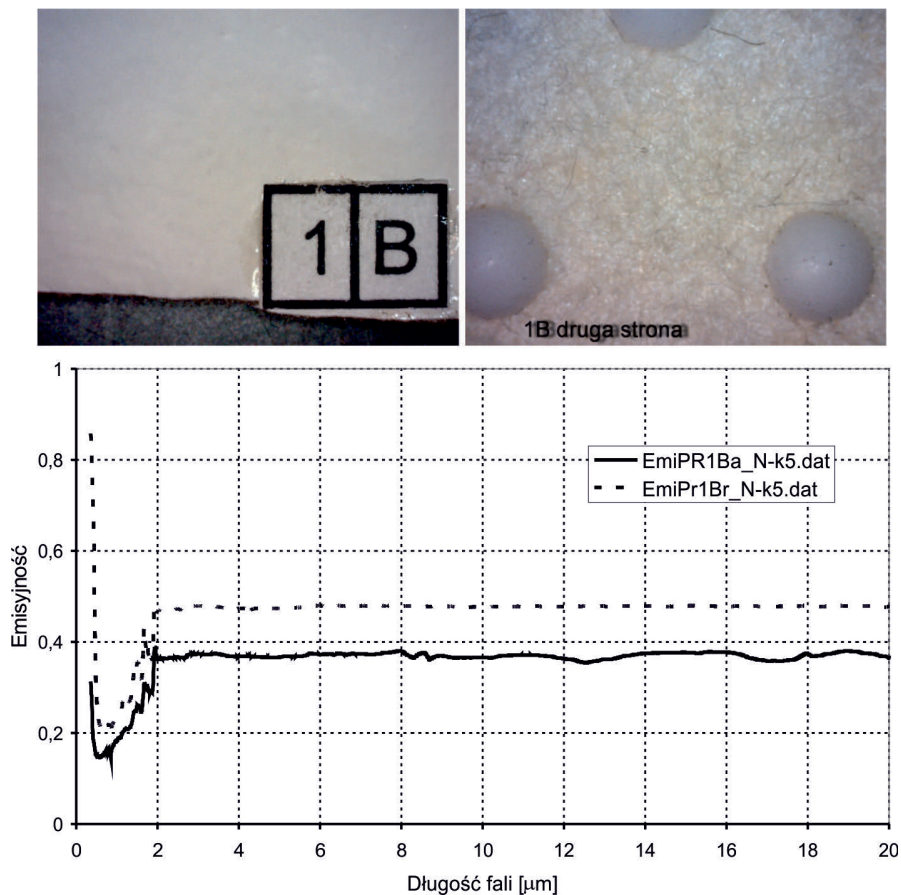
3.1. Badania emisyjności

Charakterystyczną cechą wszystkich badanych tkanin jest silna zmienność emisyjności w zakresie od ultrafioletu do 2 μm i praktycznie stała jej wartość powyżej 2 μm . Wszystkie zewnętrzne warstwy (A) pakietów ubraniowych (głównie tkaniny aramidowe i bawełniane) mają najwyższą emisyjność w zakresie spektralnym poniżej 2 μm .

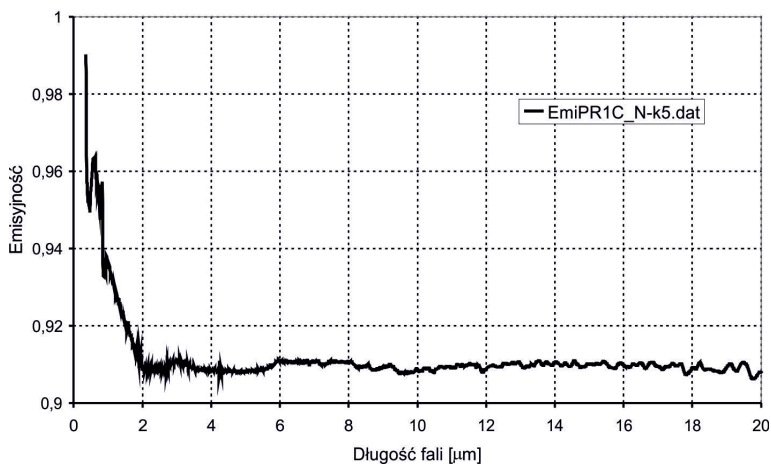
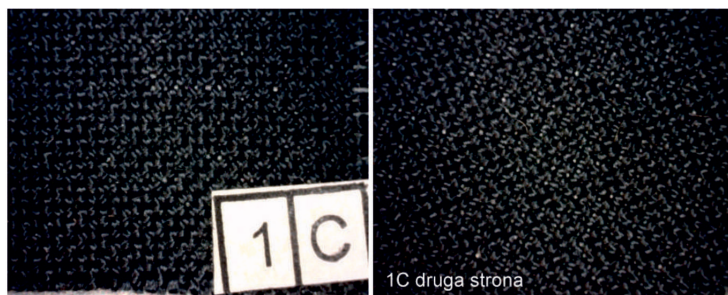


Rys. 2. Emisyjność widmowa zewnętrznej tkaniny (ozn. A), z pakietu tkanin PR1

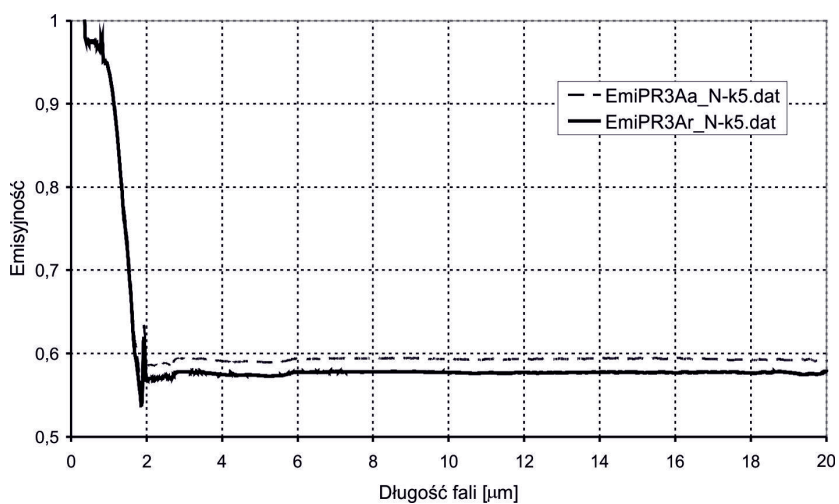
Przykładowo, emisyjność zewnętrznej warstwy pakietu nr 1 (rys. 2) zmienia się od 0,96 do 0,88, natomiast emisyjność zewnętrznej warstwy pakietu nr 3 (rys. 5) zmienia się od 0,98 do 0,6 dla strony wierzchniej oraz od 0,98 do 0,58 dla strony wewnętrznej. Oznacza to niekorzystnie wysoką emisyjność w zakresie krótkofalowym, w tym w zakresie widzialnym. Badane pakiety pochłaniają praktycznie całkowicie padające na nie promieniowanie słoneczne. Cechą charakterystyczną membran jest wysoka emisyjność w krótkofalowym zakresie badanych widm, minimum dla $0,5 \mu\text{m}$ i wzrost do wartości stałej powyżej $2 \mu\text{m}$ (rys. 5). Warstwy termoizolacyjne i podszewki charakteryzują się podobną spektralną zmiennością emisyjności, jak warstwy zewnętrzne.



Rys. 3. Emisyjność widmowa membrany (ozn. B), z pakietu tkanin PR1



Rys. 4. Emisyjność widmowa wewnętrznej tkaniny (ozn. C), z pakietu tkanin PR1



Rys. 5. Emisyjność widmowa zewnętrznej tkaniny (ozn. A), z pakietu tkanin PR3

W tabeli 1 zestawiono średnie wartości emisyjności dla poszczególnych komponentów różnych przebadanych zestawów nowych tkanin (2, 3 i 4 warstwowych), dla długości fali powyżej 2 μm , która to wartość odpowiada maksimum promieniowania dla ciała doskonale czarnego o temperaturze 1175°C. Można zatem przyjąć, że ten zakres spektralny odpowiada źródłom promieniowania, z jakimi najczęściej styka się strażak. Pomiary wykonywano dla obu stron tkanin. W przypadku różnych wartości emisyjności podano ich wartości dla awersu/rewersu.

Analiza wyników zestawionych w tabeli 1 wykazuje, że większość tkanin zewnętrznych w pakietach ubraniowych charakteryzuje się stosunkowo wysoką emisyjnością, tj. w zakresie 0,88–0,92. Tylko dwie zewnętrzne tkaniny z siedmiu badanych charakteryzowały się wyraźnie niższą emisyjnością (0,6/0,58 i 0,73). Z kolei badane membrany mają emisyjności w większości w zakresie 0,37–0,52. Dość duże zróżnicowanie emisyjności charakteryzuje warstwy termoizolacyjne; jest to zakres 0,44–0,91. Podszewki cechują się emisyjnością z zakresu 0,58–0,78. Zwraca uwagę brak konsekwencji w doborze tkanin w pakietach pod kątem korzystnych właściwości radiacyjnych. Pakiet nr 3 ma warstwę wierzchnią o najniższej emisyjności, ale membrana charakteryzuje się najwyższą emisyjnością. Pakiet nr 5 charakteryzuje się dość niską emisyjnością tkaniny zewnętrznej, membrany i warstwy termoizolacyjnej, ale najwyższą emisyjnością podszewki. Pakiety nr 2 i 7 mają niskie emisyjności membran, warstw termoizolacyjnych i podszewek, ale bardzo wysokie emisyjności tkanin zewnętrznych.

W tabeli 2 pokazano zestawienie wyników dla pakietów, które były badane wcześniej na stanowiskach zbudowanych w ramach projektu INNO-os, czyli poddane działaniu płomienia i zetknięte z płytą o podwyższonej temperaturze. Oznaczenia identyfikujące tkaniny w badanych pakietach zmodyfikowano w ten sposób, że pierwotną numerację pakietów ubraniowych poprzedzono cyfrą 1.

Działanie płomienia w przypadku pakietów nr 3 i 7 spowodowało zniszczenie membran oraz spieczenie warstwy termoizolacyjnej z podszewką. Generalnie, zastosowane obciążenia cieplne podczas badań zestawów ubraniowych nie spowodowały znaczących zmian emisyjności tkanin, które nie uległy uszkodzeniu. Zaznaczyć należy, że jednocześnie znacznie pogorszyły się właściwości mechaniczne tkaniny bawełnianej.

Przykładowe wyniki pomiarów dla wierzchniej warstwy obuwia skórzanego (rys. 6) pokazują wysoką emisyjność strony wierzchniej (0,95) w całym zakresie spektralnym i niższą emisyjność strony wewnętrznej (0,6) dla zakresu powyżej 2 μm .

Tabela 1. Emisyjności tkanin pakietów ubraniowych nowych; dla $\lambda > 2 \mu\text{m}$

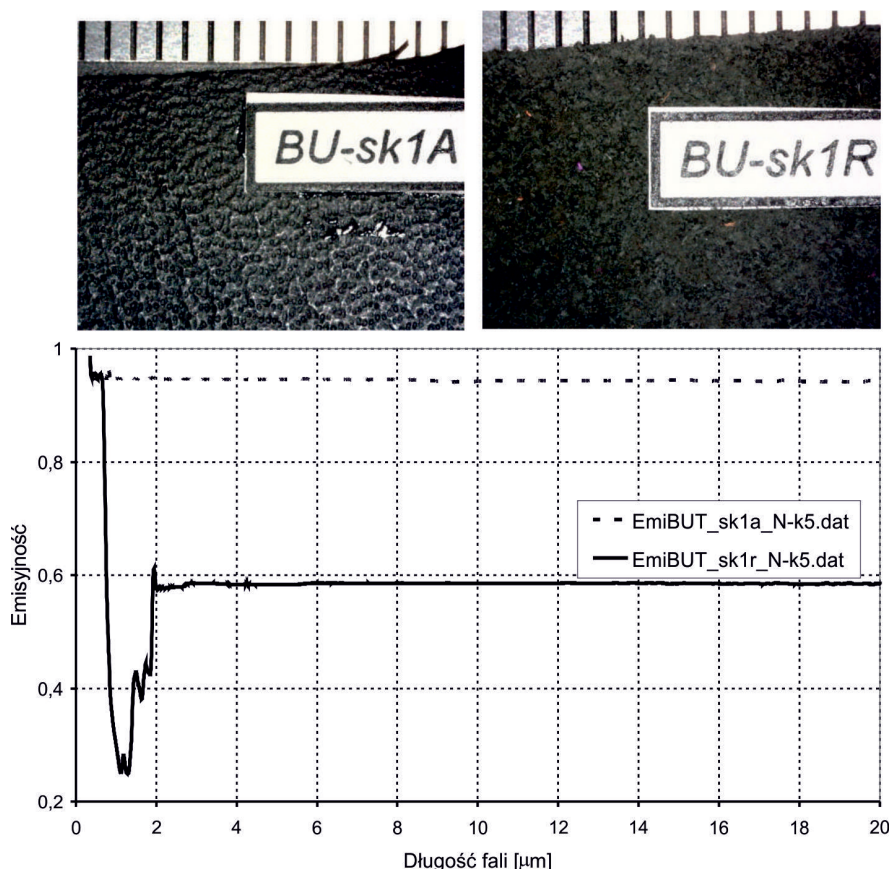
W przypadku różnych właściwości obu stron podano wartości dla awersu/rewersu

Zestaw numer pakietu tkanin ubraniowych	Tkanina A tkaniny zewnętrzne	Tkanina B membrany	Tkanina C warstwy termoizolacyjne	Tkanina D podszewki
1	0,88	0,37/0,48	0,91	–
2	0,9	0,4/0,49	0,44	0,58
3	0,6/0,58	0,86	0,77	0,77
4	0,88	0,44	0,78	0,78
5	0,73	0,52	0,64	0,8
6	0,92	0,48/0,88	–	–
7	0,92	0,48	0,48	0,66

Tabela 2. Emisyjności tkanin pakietów ubraniowych po poddaniu obciążeniom cieplnym; dla $\lambda > 2 \mu\text{m}$

W przypadku różnych właściwości obu stron podano wartości dla awersu/rewersu.

Zestaw numer pakietu tkanin ubraniowych	Tkanina A tkaniny zewnętrzne	Tkanina B membrany	Tkanina C warstwy termoizolacyjne	Tkanina D podszewki	Rodzaj obciążenia
11	0,89	0,34/0,48	0,91	–	plomień; 55 kW/m ²
13	0,55/0,58	–	0,73	0,78	gorąca płyta; 300°C
14	0,9	0,5/0,45	0,63/0,6	0,79	gorąca płyta; 500°C
15	0,8	0,6/0,47	0,61/0,63	0,79	plomień; 55 kW/m ²
17	0,92	–	0,59	0,59	plomień; 42 kW/m ²



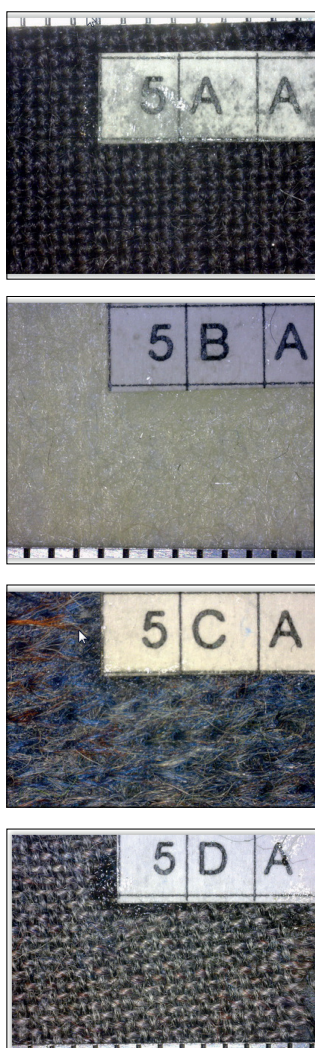
Rys. 6. Emisyjność widmowa materiału, obuwia skózanego BU-ski

3.2. Badania przepuszczalności promieniowania

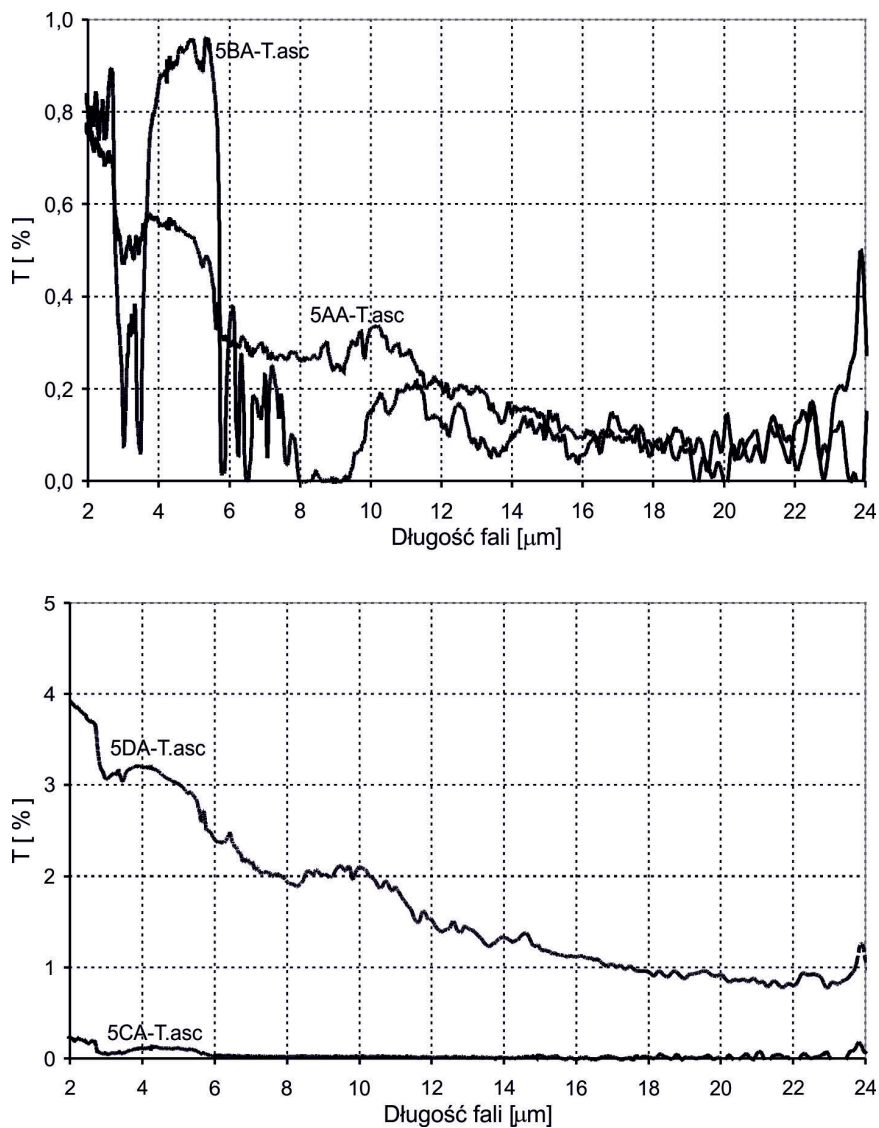
W zakresie dalszej podczerwieni to jest, od 2 μm do 20 μm pomiar widmowych charakterystyk transmitancji wybranych tkanin wykonano również na spektrometrze *FT-IR System Spectrum GX* firmy Perkin Elmer. Pomiar wykonywany był poprzez umieszczenie badanej tkaniny w torze optycznym przyrządu bezpośrednio, to jest bez przystawki odbiciowej, która była stosowana przy pomiarach widmowego współczynnika odbicia.

Poniżej zaprezentowano przykładowe wyniki pomiarów transmitancji (przepuszczalności) dla kierunku normalnego do powierzchni poszczególnych tkanin z 4-warstwowego pakietu ubraniowego nr 5 (rys. 7), złożonego

z warstwy zewnętrznej (tkanina aramidowa), membrany, warstwy termoizolacyjnej i podszewki. Przedstawiono poniżej wykresy transmitancji w funkcji długości fali promieniowania (rys. 8) w zakresie od 2 do 24 μm . Z punktu widzenia obciążeń cieplnych istotny jest zakres spektralny do 10 μm . Przepuszczalność warstwy zewnętrznej w tym zakresie wynosi od 0,3 do 0,7%, membrany od 0 do 1%, warstwy termoizolacyjnej od 0 do 0,2%, a podszewki od 2 do 4%. Dla większości badanych warstw, zwłaszcza zewnętrznych, transmitancja promieniowania cieplnego jest praktycznie pomijalna.



Rys. 7. Tkaniny z pakietu PT5



Rys. 8. Rozkłady widmowe transmitancji tkanin z pakietu PT5

4. WNIOSKI

Przegląd literatury dotyczącej ochron osobistych strażaków i związanych z nimi zagadnień wymiany ciepła wskazują, że niedoceniane są właściwości radiacyjne materiałów, z których wykonywane są te ochrony. Badania emisyj-

ności kilku zestawów komponentów (pakietów) ubrań specjalnych wskazują w większości przypadków na wysoką emisyjność warstw zewnętrznych (0,88-0,92). Celowe są więc modyfikacje prowadzące do obniżenia emisyjności tych warstw, inne niż metalizacja powłokami aluminiowymi. Zwraca uwagę brak konsekwencji w doborze przez producentów tkanin w pakietach pod kątem korzystnych właściwości radiacyjnych, tj. możliwie najniższych emisyjności wszystkich komponentów. Transmitancja badanych tkanin jest pomijalnie mała, można zatem traktować je praktycznie jako nieprzepuszczalne dla promieniowania cieplnego.

LITERATURA

- [1] Bröde P. et al.: Heat Gain From Thermal Radiation Through Protective Clothing With Different Insulation, Reflectivity and Vapour Permeability. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)*, Vol. 16 (2010), pp. 231-244.
- [2] Collin A. et al.: Study on visible-IR radiative properties of personal protective clothings for firefighting. *Fire Safety Journal*, Vol. 71 (2015), pp. 9-19.
- [3] Den Hartog E.A., Havenith G.: Analytical Study of the Heat Loss Attenuation by Clothing on Thermal Manikins Under Radiative Heat Loads. *International Journal of Occupational Safety and Ergonomics (JOSE)* Vol. 16 (2010), pp. 245-261.
- [4] Furmański P., Łapka P., Wiśniewski T.S.: „Modelowanie procesu przepływu ciepła i wilgoci w warstwach ubrań chroniących przed dużymi obciążeniami cieplnymi” w monografii „Termodynamika i wymiana ciepła w badaniach procesów cieplno-przepływowych”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2014, str. 161-185.
- [5] Kaszczuk M., Mierczyk Z., Piotrowski W., Mierczyk J.: Analysis of reflectance characteristics of selected plants, *Proc. SPIE 8040, Active and Passive Signatures II, 80400S* (9 June 2011); doi: 10.1117/12.883896.
- [6] Łapka P., Furmański P., Wiśniewski T.S.: Numerical modelling of transient heat and moisture transport in protective clothing. *Eurotherm Conference 105: Computational Thermal Radiation in Participating Media V. Journal of Physics: Conference Series 676* (2016) 012014.

- [7] Prabal T.U., Das A., Alagirusamy R.: Heat and mass transfer through thermal protective clothing – A review. *International Journal of Thermal Scienses*. Vol. 106 (2016), pp. 32-56.
- [8] Quintiere J.: Radiative Characteristics of Fire Fighters' Coat Fabrics. *Fire Technology*. Vol. 10 (1974), pp. 153-161.
- [9] Rezazadeh M., Torvi D.A.: Assessment of Factors Affecting the Continuing Performance of Firefighters' Protective Clothing: A Literature Review. *Fire Technology*, Vol. 47 (2011), pp. 565-599.
- [10] Wiśniewski S., Wiśniewski T.S.: Wymiana ciepła. wyd. 7, WNT, 2012.

Praca została wykonana w ramach realizacji projektu badawczego INNOOS „Opracowanie innowacyjnego systemu stanowisk do badań ochron osobistych” nr O ROB 0011/03/001, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.