

dr inż. GRZEGORZ GRALEWICZ
 dr inż. GRZEGORZ OWCZAREK
 Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
 dr JANUSZ KUBRAK
 Vigo SL Sp. z o.o.

Interferencyjne filtry zabezpieczające przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym na gorących stanowiskach pracy

W niniejszym artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat możliwości blokady szkodliwego promieniowania podczerwonego na gorących stanowiskach pracy metodami optyki cienkowarstwowej. Obliczono i przeanalizowano konstrukcje cienkowarstwowe pod kątem efektywności zabezpieczenia przed szkodliwym promieniowaniem. Opracowano technologie wykonywania wybranych konstrukcji filtrów technikami parowania próżniowego. Ponadto porównano właściwości filtrów obecnie dostępnych z nowymi rozwiązaniami.

Interference film against harmful infrared radiation in hot workplaces

This article presents basic information on blocking harmful infrared radiation with optical filters with thin-film coatings. Interference structures for efficient blocking of harmful radiation were calculated and analyzed. The construction of new interference optical filters against infrared radiation was compared with currently available filters.



Fot. Ariges GmbH

Wstęp

Na gorących stanowiskach pracy ze źródłami intensywnego promieniowania podczerwonego poza częstymi zagrożeniami mechanicznymi (wywołanymi np. odpryskami stopionego metalu i żużlu), iskrami oraz bezpośrednim kontaktem z płomieniem, pojawiają się również zagrożenia promieniowaniem optycznym. Stanowiska gorące występują m.in. w hutach metali i szkła, odlewniach, w walcowniach przy piecach hartowniczych oraz obrotowych w cementowniach, przy wysokotemperaturowych piecach laboratoryjnych, podczas gaszenia pożarów, a także przy spawaniu gazowym, lutospawaniu, spawaniu mikroplazmowym, elektrycznym lub elektrołobieniu, przy cięciu tlenem lub strumieniem plazmy. Zagrożenia termiczne są m.in. przyczyną wysuszenia słuzówek, oparzeń gałki ocznej, a nawet zaćmy.

Do ochrony przed promieniowaniem podczerwonym na stanowiskach pracy służą np. filtry montowane w okularach, goglach

lub osłonach twarzy. Filtry te powinny chronić użytkownika przed promieniowaniem podczerwonym, umożliwiając jednocześnie dobre widzenie przedmiotu pracy, a także rozpoznawanie sygnałów bezpieczeństwa [2, 14].

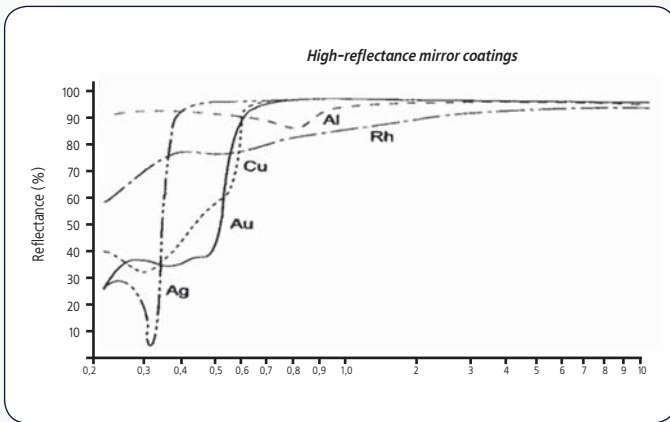
W środkach ochrony oczu i twarzy stosowane są obecnie filtry pokryte pojedynczą warstwą metaliczną odbijającą promieniowanie podczerwone [1, 3-5]. Ich wadą jest jednak bardzo mała odporność na ścieranie, wynikająca zarówno z niskiego poziomu adhezji do podłoża, jak i naturalnej miękkości metali z warstw.

Innowacją w projektowaniu filtrów ochronnych, zabezpieczających przed promieniowaniem podczerwonym, są interferencyjne, cienkowarstwowe pokrycia blokujące promieniowanie podczerwone [6, 7]. Podwyższają one znacznie trwałość filtrów, odporność na czynniki środowiska podczas użytkowania oraz poziom blokowania szkodliwego promieniowania podczerwonego.

Charakterystyka filtrów zabezpieczających przed promieniowaniem podczerwonym

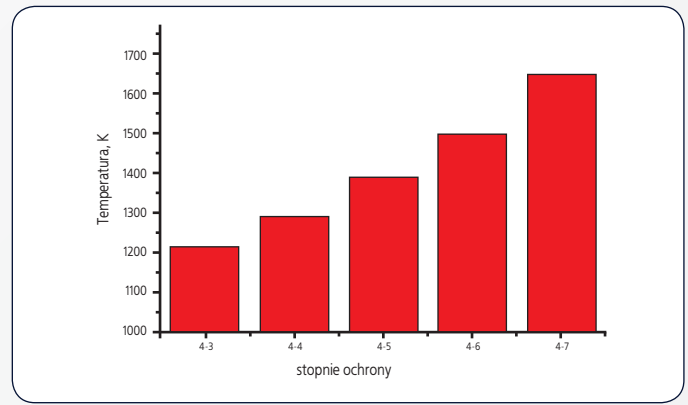
Obecnie dostępne są filtry pokryte pojedynczą warstwą metaliczną odbijającą promieniowanie podczerwone. Wykorzystują one charakterystyczne właściwości metali stosowanych do ich produkcji, czyli wysoki współczynnik odbicia promieniowania (reflektancję) w zakresie podczerwieni i znaczący współczynnik przepuszczania (transmitancję) w zakresie widzialnym. Na rys. 1. zaprezentowano spektralne charakterystyki odbicia wybranych metali z charakterystycznym obniżeniem reflektancji w obszarze widzialnym dla miedzi i złota. Metale te są również stosowane jako ekrany w konstrukcjach wizjerów antyciepnych.

Przy odpowiednio dobrej grubości metalu można uzyskać, zgodnie z wymaganiami zawartymi w normach z zakresu ochrony oczu przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym, poziomy przepuszczania promieniowania



Rys. 1. Charakterystyki odbicia wybranych metali [8]

Fig.1. Spectral characteristics of reflectance of selected metals [8]



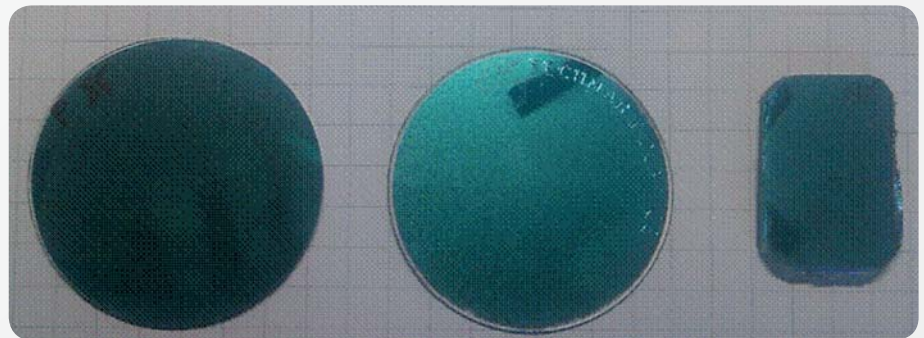
Rys. 2. Diagram obrazujący dobór stopnia ochrony filtra chroniącego przed promieniowaniem podczerwonym w zależności od temperatury źródła promieniowania

Fig.2. Diagram illustrating the selection of a scale number of a filter against infrared radiation as a function of source temperature

Tabela 1. Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczenia dla filtrów chroniących przed promieniowaniem podczerwonym o stopniu ochrony: 4-3, 4-5, 4-7

Table 1. Transmittance requirements for infrared filters with scale number 4-3, 4-5, 4-7

Stopień ochrony filtra	Współczynnik przepuszczenia światła (transmitancja świetlna) τ_v	
	Maksymalny [%]	Minimalny [%]
4-3	17,8	8,5
4-5	3,2	1,2
4-7	0,44	0,126

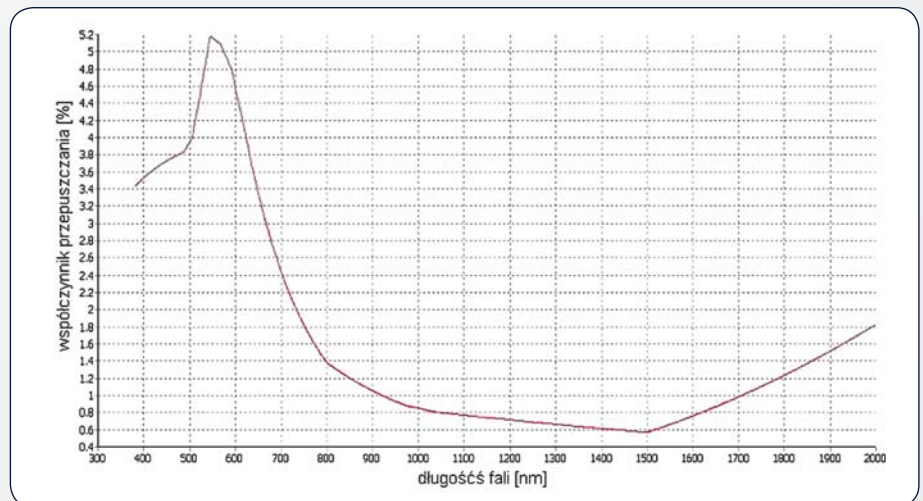


Rys. 3. Modelowe rozwiązanie filtrów ITF na podłożach szklanym o grubości 2 mm (P85) i poliwęglanowym o grubości 2 mm (PXIX/1) i 4 mm (PXIX/2)

Fig.3. Model solution for ITF filters on glass substrates with a thickness of 2 mm (P85) and polycarbonate substrates with a thickness of 2 mm (PXIX / 1) and 4 mm (PXIX / 2)

widzialnego i jednocześnie wysokie tłumienie promieniowania podczerwonego. Filtry chroniące przed promieniowaniem podczerwonym są dobierane do temperatury źródła promieniowania podczerwonego. Najczęściej stosowane są wersje charakteryzujące się stopniami ochrony: 4-3, 4-5 i 4-7, gdzie cyfra 4 oznacza filtr chroniący przed podczerwienią, a cyfry: 3, 5, 7 oznaczają stopnie ochrony zapewniane przez filtry (im wyższe oznaczenie, tym więcej promieniowania podczerwonego jest blokowanego). Na rys. 2. przedstawiono diagram obrazujący dobór stopnia ochrony filtra chroniącego przed promieniowaniem podczerwonym do temperatury źródła promieniowania.

Stopień ochrony filtra zabezpieczającego przed promieniowaniem podczerwonym określany jest wartością współczynnika przepuszczenia światła: im mniejszy współczynnik przepuszczenia światła, tym wyższy jest stopień ochrony. W tab. 1. przedstawiono wymagania dotyczące współczynnika przepuszczenia dla filtrów chroniących przed promieniowaniem podczerwonym o stopniach ochrony: 4-3, 4-5, 4-7.



Rys. 4. Charakterystyka przepuszczania filtra z pojedynczą warstwą Cu (stopień ochrony 4-5)

Fig. 4. Characteristic of spectral transmittance of a filter with a single layer of Cu (protection class 4-5)

Technologie wytwarzania filtrów interferencyjnych na podłożach ze szkła mineralnego i poliwęglanu

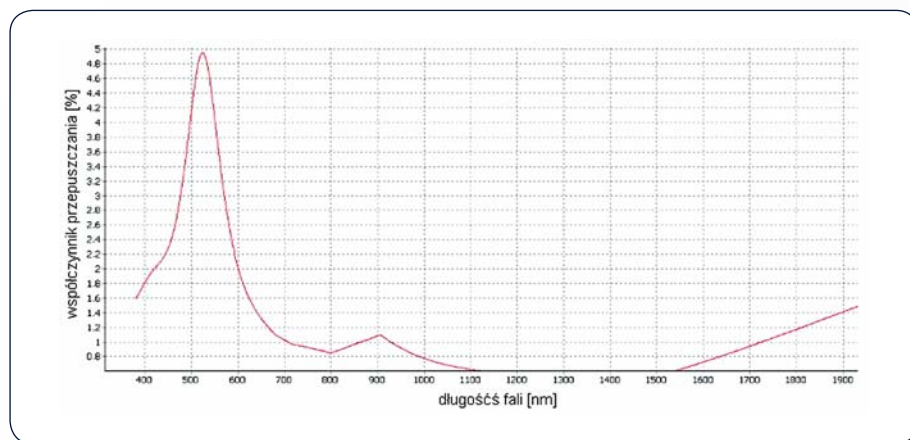
W Laboratorium Powłok Optycznych firmy VIGO SL wykonane zostały filtry na podłożu szklanym oraz poliwęglanowym. Wytworzono

je, korzystając z techniki fizycznego wyparowania [4, 9-11] w aparaturze o wysokiej próżni, stosując różne sposoby bezpośredniego wyparowania, zależnie od rodzaju stosowanych materiałów.

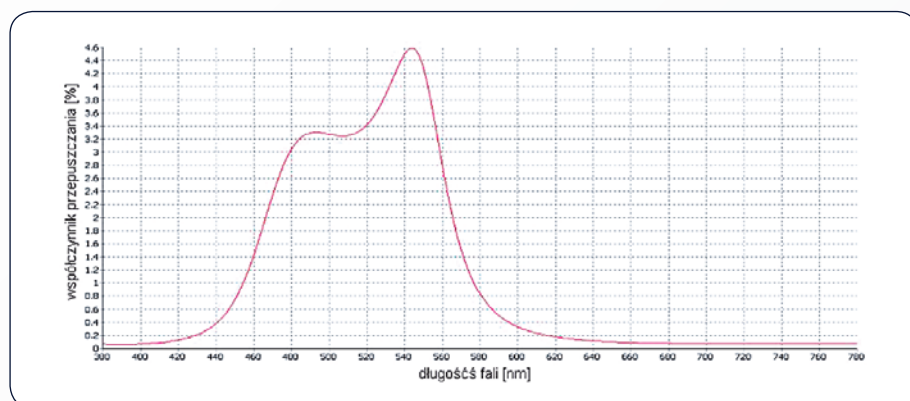
W przypadku podłoża ze szkła mineralnego parowanie i kondensacja materiałów dielektrycznych przebiega w temperaturze

ok. 300 °C, natomiast w odniesieniu do podłoża z poliwęglanu – w znacznie niższej temperaturze ok. 50-80 °C.

Materiały odparowane w tak różnych temperaturach różnią się współczynnikami załamania, strukturą, upakowaniem oraz właściwościami adhezyjnymi do podłoża.



Rys. 4. Charakterystyka przepuszczania filtru z pojedynczą warstwą Cu (stopień ochrony 4-5)
Fig. 4. Characteristic of spectral transmittance of a filter with a single layer of Cu (protection class 4-5)



Rys. 5. Charakterystyka przepuszczania filtru ITF z warstwą Al (stopień ochrony 4-5)
Fig. 5. Characteristic of spectral transmittance of a filter with an Al layer (protection class 4-5)

Tabela 2. Wyniki badań średniego widmowego współczynnika przepuszczania podczerwieni próbek P85, PXIX/2, PXIX/1
Table 2. Results of average infrared spectral transmittance of samples P85, PXIX /2, PXIX /1

Numer próbki	Średnie widmowe współczynniki przepuszczania podczerwieni τ_A i τ_N [%]		Wymaganie dotyczące średnich widmowych współczynników przepuszczania podczerwieni dla filtrów 4-5 według PN-EN 166:2005, PN-EN 171:2005 [%]	
	τ_A od 780 nm do 1400 nm	τ_N od 780 nm do 2000 nm	τ_A od 780 nm do 1400 nm	τ_N od 780 nm do 2000 nm
P85	0,027	0,011	<0,71	<10,6
PXIX/2	0,089	0,067		
PXIX/1	0,123	0,100		

Tabela 3. Wyniki badania sferycznej mocy optycznej, astygmatyzmu próbek P85, PXIX/2, PXIX/1
Table 3. Results of spherical optical power, astigmatism of samples P85, PXIX /2, PXIX /1

Oznaczenie próbki	Sferyczna moc optyczna próbki [m ⁻¹]	Astygmatyzm [m ⁻¹]	Wymaganie według PN-EN 166:2005, PN-EN 14458:2006
P85	0,00	0,00	dla 1 klasy wykonania optycznego $\pm 0,06$ [m ⁻¹]
PXIX/2	0,00	0,00	
PXIX/1	0,00	0,00	

Tabela 4. Wyniki badania zredukowanego współczynnika luminancji próbek P85, PXIX/2, PXIX/1
Table 4. Results of a reduced luminance factor of samples P85, PXIX /2, PXIX /1

Oznaczenie próbki	Zredukowany współczynnik luminancji rozproszenia światła, cd/(m ² · lx)	Wymaganie według PN-EN 166:2005, PN-EN 14458:2006
P85	0,105	0,75 $\frac{cd}{m^2 \cdot lx}$
PXIX/2	0,142	
PXIX/1	2,309	

Dlatego też technologie nanoszenia powłok interferencyjnych w odniesieniu do obu typów podłoży (substratów) są odmienne. W przypadku podłoży organicznych (poliwęglan), niezbędne jest zastosowanie dział plazmowych, lub jonowych. Kondensacja warstw przebiega w obecności zjonizowanego neutralnego lub reaktywnego gazu, co skutkuje podwyższeniem upakowania, współczynnika załamania światła i adhezji. Na rys. 3. przedstawiono modelowe rozwiązania filtrów, wykonane z wykorzystaniem technologii ITF (*Induced Transmission Filter*) [9, 12, 13] na podłożach szklanym i poliwęglanowym.

W konstrukcji modelowych rozwiązań filtrów ITF zastosowano m.in. aluminium (Al), natomiast w dostępnych obecnie na rynku filtrach z pojedynczą warstwą stosowana jest miedź (Cu). Filtry ITF zachowują podobny poziom przepuszczania w paśmie widzialnym, jak filtry z pojedynczą warstwą metaliczną miedzi (Cu). Przykładową charakterystykę spektralną transmittancji filtru z pojedynczą warstwą Cu przedstawiono na rys. 4., a filtru ITF na rys. 5. Należy zaznaczyć, że filtr ITF z warstwą Al ma charakterystykę bardziej stromą i głębszą w zakresie blokowania promieniowania podczerwonego. Można zaobserwować, że transmittancja promieniowania podczerwonego dla filtrów ITF z warstwą Al jest mniejsza, zatem filtry te zapewniają skuteczniejszą ochronę przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym.

Podczas prób technologicznych wykonania filtrów dla trzech stopni ochrony: 4-3, 4-5, 4-7 pojawiły się trudności związane z powtarzalnością procesów technologicznych, skutkujące brakiem utrzymania stopnia ochrony na wymaganym poziomie. Rozwiązaniem było wprowadzenie zmian w konstrukcji opracowywanego filtru interferencyjnego, poprzez rozdzielenie warstwy metalu – Al, między dwiema powłokami dielektrycznymi, na dwie części, wprowadzając dodatkową warstwę dielektryczną o niskim współczynniku załamania. Zmiany te spowodowały znaczące podwyższenie poziomu blokowania promieniowania podczerwonego przy tym samym poziomie współczynnika przepuszczania w zakresie widzialnym.

Następnie, aby uzyskać niezakłócone rozpoznawanie kolorów zgodnie z PN-EN 171:2005 [14], opracowano konstrukcję o poszerzonym paśmie przepuszczania w obszarze widzialnym (rys. 6.).

Wyniki badań

Wykonane modelowe rozwiązania filtrów interferencyjnych chroniące przed promieniowaniem podczerwonym zostały poddane następującym badaniom:

- współczynnika średniego widmowego współczynnika przepuszczania podczerwieni zgodnie z wymaganiami określonymi w PN-EN 166:2005 i PN-EN 171:2005 [14, 15]

– jakości materiału optycznego zgodnie z wymaganiami określonymi w PN-EN 166:2005 [15]

– sferycznej mocy optycznej, astygmatyzmu, zgodnie z wymaganiami określonymi w PN-EN 166:2005 i PN-EN 14458:2006 [15, 17]

– zredukowanego współczynnika luminancji, zgodnie z PN-EN 166:2005 i PN-EN 14458:2006 [15, 17].

Określenie widmowych współczynników przepuszczania podczerwieni pozwoliło na zweryfikowanie, czy sposób blokowania szkodliwego promieniowania podczerwonego jest wystarczający do spełnienia wymagań określonych w wymienionych powyżej normach przedmiotowych. Ocena jakości materiału optycznego, polegająca na kontroli, czy w wytworzonych próbkach nie występują defekty mające wpływ na jakość obserwacji, stanowi potwierdzenie wysokiej jakości wytworzonych filtrów. W przypadku jakichkolwiek działań dotyczących modyfikacji powierzchni podłoża, na którym wykonywane są filtry, niezmiernie istotne jest sprawdzenie, czy po modyfikacji filtr nie stał się elementem o niepożądanych właściwościach refrakcyjnych. Oznacza to, że w wyniku modyfikacji powierzchni z próbki o zerowych zdolnościach łamiących, czyli próbki bez mocy sferycznej i/lub astygmatycznej, otrzymuje się próbkę zdolną do skupiania i/lub rozpraszania światła. Jeśli po modyfikacji powierzchni próbka wykazuje właściwości refrakcyjne, oznacza to, że nie jest już elementem optycznym o tzw. zerowej mocy optycznej, co może powodować zakłócenia w obserwacji. Właściwości refrakcyjne próbki po modyfikacji powierzchni powinny pozostać niezmienione. Dopuszczalne jest występowanie jedynie tzw. szczytkowych mocy optycznych na poziomie $\pm 0,06$ dioptrii. Modyfikacja powierzchni może również być powodem tego, że filtr będzie rozpraszał więcej światła. Oczywiście jest, że wszystkie elementy optyczne, przez które dokonywana jest obserwacja powinny w minimalnym stopniu rozpraszać światło. Każde zmatowienie, zarysowanie itp. sprawia, że zwiększa się ilość światła rozproszonego w stosunku do ilości światła przechodzącego, co w konsekwencji również pogarsza obserwację. Parametrem, który pozwala na określenie ilości światła rozproszonego na próbce – stosowanym przy ocenie wszystkich elementów optycznych służących do ochrony oczu – jest tzw. zredukowany współczynnik luminancji.

W tab. 2.-4. zaprezentowano wyniki wykonanych badań, odniesiono się także do wymagań zawartych w cytowanych powyżej normach przedmiotowych [14-17].

Z wyników przedstawionych w tab. 2. widać, że dla zakresu widmowego od 780 nm do 1400 nm wartości średniego widmowego

współczynnika przepuszczania podczerwieni są od około 10 (dla PXIX/1) do około 45 (dla P85) razy niższe od wartości określonej jako maksymalna. Jeszcze lepsze rezultaty otrzymano dla całego ocenianego zakresu podczerwieni, tzn. dla zakresu od 780 nm do 2000 nm. W tym przypadku wartości średniego widmowego współczynnika podczerwieni były niższe od wartości określonej jako maksymalna, aż o około 1400 razy dla próbki oznaczonej symbolem P85.

Wyniki przedstawione w tab. 3. wskazują jednoznacznie na to, że zaproponowana modyfikacja powierzchni nie ma konsekwencji w postaci pojawienia się w filtrze wad widocznych w strukturze materiału oraz filtr nie uzyskuje dodatkowych, niepożądanych właściwości refrakcyjnych. Wartości mocy sferycznej i astygmatycznej próbek wynoszą 0,00 dioptrii (m^{-1}). Filtry pozostają więc elementami o zerowych mocach optycznych.

Z wyników przedstawionych w tab. 4. wynika, że jeden z badanych filtrów (PXIX/1) nie spełnia wymagań norm. Wartość zredukowanego współczynnika luminancji przekracza dopuszczalną wartość $0,75 \text{ cd}/(\text{m}^2 \cdot \text{lx})$. Należy jednak zwrócić uwagę, że filtr ten był wykonany na podłożu o grubości 4 mm. W praktyce, do wykonania przemysłowych filtrów ochronnych wykorzystywane są podłoża o grubościach 1 – 2,5 mm.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono charakterystykę interferencyjnych filtrów (ITF) zabezpieczających przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym oraz dokonano porównania filtrów z warstwą miedzi (Cu) z nowo opracowanymi filtrami ITF z warstwą aluminium (Al). Filtry te zostały wykonane przy wykorzystaniu dwóch technologii opracowanych na te potrzeby. Wyniki wybranych badań nowo opracowanych filtrów ITF z warstwą Al na podłożach szklanych i poliwęglanowych pozwoliły ocenić zgodność ich parametrów z wymaganiami najważniejszych norm europejskich w zakresie ochrony przed promieniowaniem podczerwonym. Wykazały one, że filtry te charakteryzują się bardzo wysokim poziomem blokowania promieniowania podczerwonego. Dla powszechnie stosowanych filtrów o stopniu ochrony 4-5 (próbka P85) wartość średniego współczynnika przepuszczania podczerwieni dla całego analizowanego zakresu (780 – 2000 nm) wynosi 0,011% i jest ponad czterdziestokrotnie niższa od dopuszczalnej wartości maksymalnej określonej w normie EN 171:2001, która wynosi 10,6%.

Filtry ITF z warstwą Al spełniają również wymagania PN-EN 166:2005, p. 7.1.2.3, PN-EN14458:2006, p. 5.2.8 odnośnie do badania zredukowanego współczynnika luminancji

(znacznie poniżej $0,75 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}}$). Opracowana

technologia wytwarzania filtrów ITF z warstwą Al na podłożach szklanych i poliwęglanowych charakteryzuje się wysoką powtarzalnością wytwarzanych wyrobów.

Opracowane filtry ITF chroniące przed szkodliwym promieniowaniem podczerwonym wraz z technologią ich wytwarzania mogą stać się atrakcyjnym przedmiotem wdrożeń dla polskich producentów środków ochrony oczu i twarzy. Ocenia się, że koszt wytworzenia filtrów ITF z warstwą Al jest nieznacznie większy niż koszt obecnie dostępnych rozwiązań.

PIŚMIENNICTWO

- [1] *Handbook of Occupational Safety and Health* – red. nauk. prof. dr hab. med. Danuty Koradeckiej. Taylor and Francis Group, LLC 2010
- [2] S. Marzec *Propozycje oceny narażenia pracowników na cyklicznie powtarzające się promieniowanie podczerwone* „Przegląd Elektrotechniczny” rok LXXXV, 11, 2009, 226-228
- [3] S. Marzec *Zagrożenie promieniowaniem podczerwonym na wybranych stanowiskach pracy w hutnictwie żelaza i stali*, „Praca-Zdrowie-Bezpieczeństwo” 2001, 2, 4-7
- [4] L. Epstein *Improvement in heat reflecting filters* „J. Opt. Soc. Am.” 1955, 45, 360-2
- [5] L.I. Epstein *Improvements in heat reflecting filters*. JOSA 1955, 45, 1360-2 L.I. Maissel and Reinhard Glang, *Handbook of Thin Film Technology*, McGraw-Hill Book Company
- [6] J. Kubrak, L. Włodarski *Interferencyjne sterowanie promieniowaniem UV*. Materiały z konferencji UVR 2002
- [7] J. Kubrak, G. Owczarek *Interference corrector of optical radiation*. *Proceedings of SPIE Systems of Optical Security' 2001*
- [8] H. Angus MacLeod *Thin – Film Optical Filters*. 3-ed Edition, Institute of Physics Publishing, 2001
- [9] P. H. Berning, A. F. Turner *Induced Transmission In Absorbing Films Applied to Bandpass Filter Design*, vol. JOSA, Issue 3, pp. 230-239, 1957
- [10] Baumeister *Optical Coating Technology*
- [11] *Handbook of Thin Films Technology*. Ed. By L. I. Maissel and R. Glass, 1970
- [12] V. Landau, P. H. Lissberger *Theory of Induced Transmission Filters in Terms of the Concept of Equivalent Layer* JOSA 62, 1972
- [13] A. Sytchkowa *Reliable Deposition of ITF with a Single Metal Layer*. „Applied Optics”, vol. 50 2011
- [14] PN-EN 171: 2005 Ochrona indywidualna oczu – Filtry chroniące przed podczerwienią – Wymagania dotyczące współczynnika przepuszczania i zalecane stosowanie
- [15] PN-EN 166: 2005 Ochrona indywidualna oczu – Wymagania
- [16] PN-EN 167: 2005 Ochrona indywidualna oczu – Optyczne metody badań
- [17] PN-EN 14458:2006 Sprzęt do indywidualnej ochrony oczu – Osłony twarzy i wizjery do użycia w hełmach strażackich o wysokiej skuteczności w zakresie bezpieczeństwa przemysłowego, używane przez strażaków, załogi karet i służby ratownicze

Publikacja opracowana na podstawie wyników I etapu programu wieloletniego pn. „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2008-2010 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Pracy i Polityki Społecznej. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.