

Szkła z powłokami energooszczędnymi niskoemisyjnymi i niskoemisyjnymi-przeciwśłonecznymi

Streszczenie

Powłoki stanowią cienkie, prawie niewidoczne warstewki metali i/lub związków metali, najczęściej tlenków naniesionych na powierzchnię szkła w celu uzyskania nowych właściwości bez konieczności modyfikacji składu szkła w całej jego objętości. Najczęściej zadaniem powłok jest uzyskanie większej izolacyjności termicznej w zakresie ochrony przed stratami ciepła i/lub przegrzaniem pomieszczeń w budynkach. Szkło może być powlekane „on-line” na gorąco, bezpośrednio w linii jego formowania (tlenki i inne związki metali), lub „off-line”, na uformowane wcześniej i odpowiednio oczyszczone tafle szkła. Najczęściej poza linią formowania powleka się szkła z powłokami niskoemisyjnymi, których zasadniczą składową stanowi cienka warstewka odpowiedniego metalu. Najczęściej stosowaną w tym celu metodą jest metoda fizyczna polegająca na magnetronowym rozpylaniu materiału powłoki w warunkach próżniowych. W artykule przedstawiono podstawowe informacje odnośnie otrzymywania, właściwości i zastosowań szkielez z powłokami niskoemisyjnymi, tzw. „low-E” (od low-emissivity glass).

Słowa kluczowe: szkło powlekane, powłoki niskoemisyjne, powłoki przeciwśłoneczne

Glasses with energy – saving low-emissive and solar control low-emissive coatings

Abstract

Coating of the glass surface with thin films of metals and metal compounds such metal oxides and the others is a very effective way to obtain the new properties of the glass without necessity to modify the bulk glass composition. The thin film coated glass is commonly used in buildings with aim to enhance the user's comfort and energy saving. The coatings of metal compounds on glass may be obtained both “on-line” during the forming process and „off-line”, but in that case the glass sheets needs to be carefully cleaned before coating process. Thin films of metals for low emissive glasses needs to be coated „off-line” in the vacuum conditions. The method commonly used in commercial production of energy saving low-emissive (Low-E) glasses is magnetron sputtering. In this paper there some basic information on the properties and coating methods used in glass industry for producing the Low-E and Solar-Low-E glasses have been presented.

Keywords: coated glass, Low-E coatings, Solar control coatings

Wprowadzenie

Roczna światowa produkcja szkła płaskiego liczy się w dziesiątkach milionów ton sześciennych (np. z ok. 41 mln ton w roku 2005 do ok. 56,5 w roku 2010) i ciągle rośnie. Przewiduje się, że światowe zapotrzebowanie na szkło płaskie będzie począwszy od 2010 roku rosła w tempie ok. 5,3–5,5% na rok, w tym ok. 4,8% będzie dotyczyło szkła przetworzonego. W całości produkcji szkła płaskiego szyby na oszklenia w budownictwie stanowią ok. 70%, pozostałe ilości przypadają na szyby samochodowe – ok. 10% oraz meblarstwo, urządzenia AGD i inne zastosowania wewnętrzne – ok. 20%. Europa, Chiny i Stany Zjednoczone dostarczają ok. 76% produkcji szkła płaskiego, przy czym głównymi producentami są wielkie koncerny światowe tj. Pilkington, Saint Gobain, AGC, Guardian oraz PPG. Spośród wymienionych, pierwsze cztery największe koncerny grupują zakłady produkcyjne i przetwórcze działające w wielu krajach, w tym w Polsce i dostarczające wyroby do przeszło 130 krajów. Ostatnio do koncernów dłużej obecnych na rynku polskiego szkła w coraz szerszym zakresie dołącza firma PPG.

Większość szkła produkowanego dla potrzeb budownictwa i przemysłu motoryzacyjnego produkowana jest metodą Float, wynalezioną w 1952 roku przez sir Alastaira Pilkingtona i opatentowaną przez brytyjską firmę Pilkington [1]. Metoda Float jest zarazem najnowocześniejszą i najbardziej ekonomiczną jak i wyznaczającą najwyższe standardy jakości technologią wytwarzania szkła w świecie. Szerokie rozpowszechnienie metody Float, która bez dodatkowej obróbki umożliwia produkcję szkła o wysokiej jakości optycznej, spełniającego wymogi zarówno dla oszkleń budowlanych jak i lusterek i szyb dla środków transportu ma związek z rozwojem przetwórstwa szkła płaskiego pod kątem uzyskania nowoczesnych wyrobów i zastosowań, m. in. takich jak szkła z różnego rodzaju powłokami, szkła o zwiększonej wytrzymałości mechanicznej, elementy konstrukcyjne ze szkła i na bazie szkła (np. szyby zespolone, szkło klejone, podłoża i pokrycia szklane dla energetyki słonecznej, itp.). Przy tym należy zaznaczyć, że szkła z powłokami mogą być w szerokim zakresie podawane operacjom przetwórczym takim jak szkło nie powlekane. Dotyczy to zwłaszcza szkielez z powłokami otrzymywanymi metodami chemicznymi w procesach wysoko temperaturowych, które zapewniają wysoką trwałość powłok.

Nowoczesne szkła niskoemisyjne mogą łączyć funkcje kontroli energii promieniowania słonecznego i promieniowania z zakresu dalekiej podczerwieni, odpowiadającego energii stosowanej do celów grzewczych oraz emitowanej w warunkach otoczenia. Ogólnie dotyczy to szkieł zdolnych chronić pomieszczenia zarówno przed przegrzaniem z powodu bezpośredniego ciepłego promieniowania słonecznego jak i utratą ciepła w wyniku jego emisji w kierunku otoczenia o niższej temperaturze [1, 2].

Tego rodzaju szkła, projektowane są w sposób umożliwiający zarówno wykorzystanie właściwości energooszczędnych niskoemisyjnych jak i biernego wykorzystania energii słonecznej. Ponadto szkła powlekane łączą funkcje niskoemisyjne i/lub przeciwsłoneczne powłok nanoszonych nowoczesnymi metodami z właściwościami użytkowymi i wysoką estetyką wyglądu szkła float. Nowoczesne szkła z powłokami są produkowane w szerokiej gamie różnorodnych właściwości optycznych i zależnie od dalszej obróbki mogą służyć do różnych zastosowań.

Ochrona przed promieniowaniem słonecznym w przypadku szkieł refleksyjnych- przeciwsłonecznych może polegać na absorpcji i/lub odbiciu zwłaszcza ciepłego promieniowania słonecznego, tj. części promieniowania słonecznego leżącego w bliskiej podczerwieni, w zakresie rozpoczynającym się bezpośrednio za promieniowaniem widzialnym. Miarę oceny zdolności ochrony przeciwsłonecznej szkieł barwionych w masie (absorpcyjnych) i szkieł powlekanych o właściwościach przeciwsłonecznych (refleksyjnych) stanowi współczynnik ochrony słonecznej SHGC (solar heat gain coefficient, określanej też symbolem SC), wyrażający procentowy udział energii słonecznej bezpośrednio przepuszczanej lub zaabsorbowanej i wtórnie wypromieniowanej do budynku. Im niższy jest ten współczynnik tym lepsza jest ochrona przeciwsłoneczna.

Z kolei kontrola warunków termicznych (energooszczędność) odnosi się do właściwości izolacyjnych i oznacza zdolność szkła do ochrony przed przenikaniem drogą przewodzenia długofalowej części widma – promieniowania ciepłego w stronę otoczenia o niższej temperaturze. Miarą tej zdolności jest emisyjność, oznaczana symbolem E lub ϵ . Im niższa jest wartość E tym lepszą izolacyjnością termiczną i energooszczędnością cechuje się dane szkło niskoemisyjne (Low-E glass) [1, 3].

Ogólnie, termoizolacyjność szkła określa się jego zdolnością przeciwdziałania naturalnej tendencji przekazywania ciepłego promieniowania długofalowego drogą przewodzenia, od strony cieplejszej do chłodniejszej. Miarą izolacyjności cieplnej szkieł i oszkleń jest wartość współczynnika przenikania ciepła U [W/m^2K]. Zależnie od składu powłoki szkło niskoemisyjne („Low-E” Glass) może wykazywać emisyjność normalną nawet tak niską jak rzędu 0,01–0,02 (wartość U poniżej 1,1) a oszkleń wielokrotne z zastosowaniem tego rodzaju szkieł i przestrzeniami międzyszybowymi wypełnionymi gazami o niskiej przewodności cieplnej (argon, a zwłaszcza krypton) mogą osiągać wartości współczynnika U rzędu 0,6–0,5 [W/m^2K]. Dla porównania, wartość U dla szkła pojedynczej szyby ze szkła zwykłego wynosi ok. 5,8 [W/m^2K] a dla szyby zespolonej ze zwykłego szkła o grubości 4 mm i z przestrzenią międzyszybową o szerokości 2 mm, wynosi on ok. 2,8 [W/m^2K].

W związku z kryzysem energetycznym, stale rośnie nacisk na stosowanie coraz większych ilości szkła powlekanego, w tym zwłaszcza niskoemisyjnego. W Europie nasiloną tendencją wzrostową trwa od lat 90. ub. wieku i ma związek z pomyślnym rozwiązaniem problemów związanych z hartowaniem szkła z powłokami niskoemisyjnymi. Od roku 2000 obserwuje się też dynamiczny wzrost produkcji i stosowania szkieł powlekanych w krajach azjatyckich [4, 5].

Równocześnie trwa intensywny rozwój w zakresie nowych funkcji powłok i zaawansowanych zastosowań szkieł powlekanych. Nowoczesne szkła powlekane typu („smart” glass), w których przepuszczalność światła i ciepła może być w szerokim zakresie regulowana elektronicznie, stanowią podstawowy materiał dla zaawansowanych oszkleń. Obecnie wiodąca rola w badaniach i rozwijaniu produkcji tego rodzaju szkieł przypada Stanom Zjednoczonym i Europie lecz przy ciągle rosnącym udziale Chin. Dzięki stałemu wzrostowi zdolności produkcyjnych istniejących i powstawaniu nowych zakładów produkcyjnych oczekuje się, że do roku 2020 wartość produkcji tego rodzaju szkieł powlekanych wzrośnie do 700 mln USD [6].

Powłoki na szkło – stosowane materiały i klasyfikacja szkieł z powłokami

Grubość powłok na szkło powlekanym wynosi zwykle od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$). Powłoka wraz z podłożem szklanym tworzy układ, którego właściwości użytkowe zależą zarówno od charakterystyk zastosowanych materiałów jak i metody otrzymywania powłoki.

Wśród materiałów stosowanych do powlekania szkła użytkowego, zwłaszcza dla budownictwa i motoryzacji, szczególne miejsce zajmują metale, zwłaszcza szlachetne oraz tlenki metali. Rzadziej stosowane są inne związki metali, np. azotki, przy czym półprzewodnikowe nie tlenkowe związki niektórych metali (np. siarczki, selenki), służą głównie do otrzymywania powłok dla najnowszej generacji zastosowań, np. dla urządzeń fotowoltaicznych. Do materiałów stosowanych na powłoki dla szkła należy też krzem, stosowany m. in. do wytwarzania odpornych lusterek oraz związki krzemu, zwłaszcza z wodorem i węgłem, (np. szkła dla urządzeń powielających).

W nowych, zaawansowanych oszkleśniętach dla budownictwa i optoelektroniki, np. elektrochromowych, elektroluminescencyjnych, fotowoltaicznych itp., powłoki stanowią w istocie układy wielowarstwowe, o zróżnicowanym składzie chemicznym i pełnionych funkcjach. Układy powłok dla elektroniki, optoelektroniki, zastosowań fotowoltaicznych i zaawansowanych oszkleń wymagają podłoży szklanych z warstwami elektroprzewodzącymi o charakterze przezroczystych elektrod.

Większość aktualnie produkowanego komercyjnie szkła powlekanego dla budownictwa i motoryzacji stanowi szkło refleksyjne o właściwościach przeciwsłonecznych (ang. solar control glasses), kontrolujące przepuszczalność i odbicie światła i energii promieniowania słonecznego, szkło z powłokami tzw. niskoemisyjnymi (low emissivity glasses) oraz szkło łączące właściwości niskoemisyjne i przeciwsłoneczne (Low-E Solar glasses). Powłoki z materiałów powszechnie stosowanych do powlekania szkieł o właściwościach refleksyjnych przeciwsłonecznych i/lub niskoemisyjnych, tj. powłoki z metali i z tlenków metali, zależnie od składu i grubości mogą być bezbarwne, barwne lub neutralne z odcieniem barwnym.

Powłoki refleksyjne-przeciwsloneczne mogą mieć charakter metaliczny (np. Au, Cu, Fe-Ni, Ni-Cr, stal szlachetna itp.), tlenkowy – oparty zwłaszcza na tlenkach metali przejściowych głównie szeregu żelaza, lub azotkowy – najczęściej TiN i na ogół cechują się wysokim współczynnikiem odbicia światła. Przepuszczalność światła i energii promieniowania słonecznego, zależnie od zdolności absorpcji i odbicia w tych zakresach promieniowania, może w przypadku tego rodzaju szkiele kształtować się w szerokich granicach, od bardzo niskiej, rzędu kilku procent, tj. podobnej jak szkła bezbarwnego do nawet kilkudziesięciu procent.

Przy projektowaniu właściwości szkiele powlekanych szeroko wykorzystuje się właściwość addytywności charakterystyk optycznych podłoża szklanego i cienkiej warstwy materiału powłoki. Pozwala to korzystnie modyfikować właściwości szkiele z powłokami, poprzez otrzymanie powłok o określonych funkcjach na podłożach ze szkła bezbarwnego lub ze szkła absorpcyjnego barwionego w masie. Wynikiem możliwości nanoszenia powłok o różnych właściwościach, zarówno bezbarwnych jak i barwnych na podłoża bezbarwne i barwne a następnie zestawiania takich szkiele w oszkleniach wielokrotnych jest bogaty i ciągle poszerzany asortyment rynkowy szkiele powlekanych, zwłaszcza dla zastosowań w budownictwie.

Szczególnie zróżnicowaną pod względem parametrów spektrofotometrycznych i wartości współczynnika emisyjności stanowią szkła powlekane łączące właściwości przeciwsloneczne i energooszczędne. Do tej grupy należą szkła z powłokami charakteryzującymi się podwyższoną zdolnością odbicia promieniowania cieplnego zarówno w zakresie słonecznym jak i dalszej podczerwieni. Na ogół szkła takie są barwne, dzięki barwnemu materiałowi powłoki i/lub zastosowaniu w charakterze podłoża szkiele absorpcyjnych barwionych w masie.

Atrakcyjny wygląd szkiele powlekanych, zwłaszcza refleksyjnych-przeciwslonecznych i niskoemisyjnych-przeciwslonecznych nanoszonych na szkło barwne, pozwala wzbogacać estetyczne właściwości fasad budynków. Właściwą barwę tego rodzaju szkiele określa się w świetle przechodzącym. Ogólnie, zmianę barw przedmiotów obserwowanych przez szkło określa wskaźnik oddawania barw R_a , którego maksymalna wartość wynosi 100. Im większe jest wymaganie dotyczące właściwego postrzegania barw, jak np. w budownictwie mieszkaniowym w klimacie umiarkowanym i w chłodniejszych strefach klimatycznych, tym wskaźnik oddawania barw dla szkiele powlekanych powinien być większy.

Barwa powłok w świetle odbitym jest zwykle srebrzysta lub niebieskawa, jakkolwiek dla bardzo cienkich powłok może ona być bardziej zróżnicowana z powodu nakładania się efektu interferencji światła. Szkła z powłokami niskoemisyjnymi mają na ogół barwę neutralną (wskaźnik R_a możliwie wysoki, powyżej 80 – ok. 100) i odznaczają się wysoką zdolnością odbijania promieniowania cieplnego z zakresu dalekiej podczerwieni. Oszklenia z udziałem tego rodzaju szkiele, zwykle w postaci szyb zespolonych lub podwójnych elementów elewacyjnych, mają za zadanie zmniejszanie strat ciepła z budynku do otoczenia a także ochronę pomieszczeń przed przegrzaniem nadmiernym promieniowaniem słonecznym.

Powłoki o właściwościach wyłącznie przeciwslonecznych wprawdzie nie obniżają współczynnika przenikania ciepła szkła U [W/m^2K], ale szkła z takimi powłokami

znajdują szerokie zastosowanie w kombinacji z szybami niskoemisyjnymi w oszkleniach łączących termoizolacyjność z ochroną przed promieniowaniem słonecznym oraz w postaci elementów elewacyjnych. Latem szyby o tego rodzaju właściwościach stanowią ochronę przed nadmiarem światła słonecznego i przegrzaniem, same nie ulegając przy tym nagrzewaniu. Stanowi to ważną zaletę tego rodzaju szkiele przeciwslonecznych w porównaniu ze szklami absorpcyjnymi, które nagrzewając się, wypromieniowują część zaabsorbowanego ciepła w kierunku wnętrza, pogarszając jego komfort termiczny, a wskutek zmian warunków atmosferycznych w otoczeniu, często ulegają pękaniu. Z kolei zimą, przy niskim położeniu słońca nad horyzontem, właściwości absorpcyjne szkiele z tego rodzaju powłokami, zapewniają, że zaabsorbowana przez nie energia słoneczna, na drodze wtórnego promieniowania trafia do wnętrza budynków. W związku z tym, poprawie ulega komfort użytkowania budynków, w których na elewacje zastosowano tego rodzaju szkła powlekane.

Właściwości szkła powlekanego, a zwłaszcza odporność chemiczna i mechaniczna powłoki zależą głównie od metody nanoszenia powłoki i mają decydujący wpływ na wymagania odnośnie warunków jego przechowywania i użytkowania, w tym zwłaszcza czy szkło powlekane może być stosowane w formie monolitycznej lub czy musi być chronione przed warunkami otoczenia przez zastosowanie w szybach zespolonych lub klejonych. Najtrwalsze powłoki uzyskuje się metodami chemicznymi połączonymi z obróbką termiczną w temperaturach bliskich temperatury mięknienia szkła, takich jak procesy pirolizy i chemicznego osadzania z fazy pary (CVD, chemical vapour deposition) oraz metodą zol-żel. Powłoki uzyskane tymi metodami są związane z podłożem szklanym silnymi wiązaniami chemicznymi.

Powłoki uzyskane metodami fizycznymi (rozpylenie katodowe, reaktywne rozpylenie katodowe, rozpylenie magnetronowe wymagają ochrony przed wpływem czynników atmosferycznych i uszkodzeniami mechanicznymi. W grupie metod fizycznych, nowoczesne fizyczne metody powlekania ze wspomaganie magnetronowym pozwalają na stosowanie szkiele powlekanych w formie monolitycznej ale tylko we wnętrzach budynków.

Zależnie od potencjalnych możliwości zastosowań w budownictwie, uwarunkowanych metodą nanoszenia, powłoki, według przedmiotowej normy PN-EN 1096-1 – Szkło w budownictwie. Szkło powlekane. Część 1: Definicje i klasyfikacja, szkła z powłokami dzieli się na następujące kategorie:

- kategoria A: powierzchnia powlekana tego szkła może być zwrócona na zewnątrz lub w kierunku wnętrza budynku;
- kategoria B: szkło powlekane może być stosowane jako oszklenie monolityczne, lecz powierzchnia powlekana powinna znajdować się po wewnętrznej stronie budynku;
- kategoria C: szkło powlekane powinno być stosowane tylko jako składnik uszczelnionych oszkieleń wielokrotnych, z zaleceniem aby powierzchnia powlekana była zwrócona w kierunku przestrzeni międzyszybowej;
- kategoria D: szkło powlekane powinno być montowane w szybach zespolonych możliwie zaraz po naniesieniu powłoki, przy czym strona powlekana powinna być zwrócona w kierunku przestrzeni międzyszybowej. Szkła takie nie mogą być stosowane jako monolityczne;

- kategoria S: powierzchnia powlekana tego szkła może być skierowana zarówno na zewnątrz jak i do wnętrza budynków, lecz te rodzaje szkła powlekanych mogą być stosowane tylko do wyraźnie określonych zastosowań, np. na witryny sklepowe;

Ogólnie, szkła powlekane pod względem trwałości powłok powinny odpowiadać wymaganiom podanym w normach PN-EN 1096-2 (kategorie A, B i S) oraz PN-EN 1096-3 (kategorie C i D), które określają rodzaje i warunki badań służących sprawdzaniu odporności dla szkła należących do poszczególnych kategorii. Odpowiedzialność za zakwalifikowanie szkła z powłoką do danej kategorii ponosi jego producent.

Kryteria oceny i właściwości szkła z powłokami niskoemisyjnymi i niskoemisyjnymi – przeciwstawnymi

Podstawowe kryteria oceny właściwości optycznych szkła powlekanych i oszkleń z ich udziałem stanowią współczynniki przepuszczalności, odbicia, absorpcji i parametry pochodne (np. współczynnik całkowitej przepuszczalności energii słonecznej g , wskaźnik R_a , współrzędne barwowe i inne) określane przez charakterystyki spektralne przepuszczalności, odbicia i absorpcji promieniowania elektromagnetycznego w zakresach ultrafioletowym, widzialnym i bliskiej podczerwieni UV-VIS-NIR oraz w zakresie dalekiej podczerwieni (IR).

Ogółem, suma współczynników określających dla strumienia promieniowania słonecznego udziały przepuszczalności (τ_e), odbicia (ρ_e) i absorpcji (α_e) równa się jedności

$$\tau_e + \rho_e + \alpha_e = 1 \quad (1)$$

Jednym z podstawowych parametrów oceny właściwości szkła z powłokami i oszkleń z ich udziałem jest współczynnik całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego ($SF = \text{solar factor}$, współczynnik słoneczny) (g). Wielkość tego współczynnika, teoretycznie zawierającego się w przedziale od 0–1, określa jaka część (frakcja) część promieniowania słonecznego padającego na szkło powlekane jest całkowicie przez nie przepuszczana bezpośrednio jak również pośrednio – w wyniku absorpcji z następnym przekazaniem w postaci energii cieplnej. Wzory i dane spektralne potrzebne do obliczania tego współczynnika podane są w normie EN 410. Ogólnie, współczynnik g oblicza się jako sumę współczynnika przepuszczalności bezpośredniej promieniowania słonecznego (τ_e), odpowiadającego części padającego promieniowania słonecznego, która jest bezpośrednio przepuszczana przez szkło i współczynnika wtórnego przekazywania ciepła przez oszkleń w kierunku wnętrza (q_i),

$$g = \tau_e + q_i \quad (2),$$

przy czym

$$\alpha_e = q_i + q_e \quad (3),$$

gdzie:

q_i – jest współczynnikiem wtórnego przekazywania ciepła przez oszkleń w kierunku wewnętrznym,

q_e – jest współczynnikiem wtórnego przekazywania ciepła przez oszkleń w kierunku zewnętrznym,

Ogółem, α_e odpowiada tej części padającego promieniowania słonecznego, która jest zaabsorbowana przez oszkleń a następnie przekazywana przez konwekcję oraz długofalowe promieniowanie podczerwone (IR).

Do oceny właściwości użytkowych oszkleń, w tym zwłaszcza z udziałem szkła z powłokami niskoemisyjnymi stosuje się pomiar emisyjności powłok i współczynnika przenikania ciepła U .

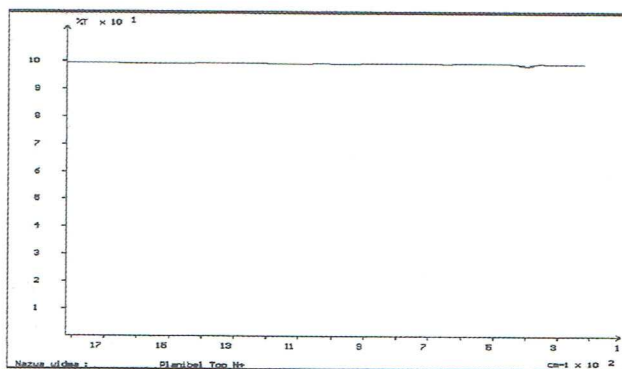
Emisyjność normalna (ϵ_n) określa zdolności emisyjne powierzchni powlekanej szkła mierzonej w kierunku prostopadłym do powierzchni w stosunku do zdolności emisyjnej ciała doskonale czarnego. Należy przy tym zwrócić uwagę, że właściwe wyniki pomiaru emisyjności normalnej zależą od gładkości powierzchni i dla powłok o rozwiniętej teksturze (np. porowatych, szorstkich czy moletowanych) mierzone wartości ulegają znacznemu zawyżeniu [7]. Podobnie dzieje się w przypadku powłok bardzo cienkich, gdzie promieniowanie penetruje podłoże. Ogólnie podłoże szklane powinno być dostatecznie grube, aby było nie przezroczyste dla promieniowania z zakresu pomiarowego. Promieniowanie o pozostałych długościach fal jest silnie absorbowane przez podłoża szklane i w związku z tym programy do pomiarów i obliczeń bazują na praktycznej zależności [7–10]:

$$\epsilon_n = 1 - R \quad (4),$$

gdzie:

R – odbicie materiału mierzone możliwie prostopadle do powierzchni.

Na rys. 1 pokazano wynik pomiarów odbicia promieniowania podczerwonego metodą spektrometryczną, zgodnie z normami PN-EN 12898 i PN-EN 673. Krzywa została wykreślona przez połączenie wartości odbicia zmierzonych dla długości fal promieniowania określonych w w/w normach. Wynik dotyczy szkła Planibel Top N+ z powłoką miękką, które zastosowane w szybach zespolonych pozwala uzyskać współczynnik przenikania ciepła U na poziomie 1,1 [W/m²K], pomiaru dokonano w Instytucie Ceramiki i Materiałów Budowlanych – Oddział Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie, z użyciem spektrometru dalekiej podczerwieni (Specord M80, C. Zeiss, Jena) z przystawką do pomiaru odbicia przy kącie padania promieniowania zbliżonym do 90°.



Rys. 1. Wynik pomiarów odbicia promieniowania podczerwonego metodą spektrometryczną dla szkła niskoemisyjnego Planibel Top N+ z powłoką miękką, naniesioną magnetronowo

Najmniejsze wartości emisyjności i zarazem największe wartości współczynników odbicia w podczerwieni mają metale o wysokiej przewodności elektrycznej, a w związku z tym zwłaszcza metale szlachetne [7, 12]. Tłumaczy to powszechne stosowanie powłok srebrnych, które niską emisyjność łączą z neutralną barwą, pożądaną dla szkła niskoemisyjnych przeznaczonych dla budownictwa i motoryzacji. W oparciu o teorię elek-

tromagnetyzmu Maxwella, Drude podał przybliżony wzór do obliczania emisyjności normalnych monochromatycznych dla powierzchni metali, dobrze stosujący się do powłok metalicznych i elektroprzewodzących na bazie domieszkowanych materiałów półprzewodnikowych (przy $\lambda > 2 \mu\text{m}$, optymalnie dla szkieł niskoemisyjnych przy $\lambda \sim 10\text{--}12 \mu\text{m}$) [7]:

$$\varepsilon_n \approx K\sqrt{\rho/\lambda} \quad (5),$$

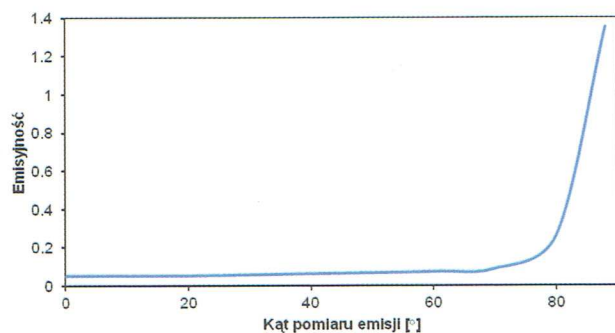
gdzie: $K = 0,365 \Omega^{1/2}$

ρ – rezystywność materiału [$\Omega \cdot \text{cm}$],

λ – długość fali [cm].

Dla szkieł sodowo-wapniowych a także borokrzemianowych nie powlekanych lub powlekanych powłokami nie mającymi wpływu na emisyjność, przyjmuje się emisyjność skorygowaną 0,837 [13].

Emisyjność zależy od kąta padania promieniowania, jak pokazano na rys. 2. W związku z tym, pomiar powinien odbywać się przy kącie padania pomiarowej wiązki promieniowania możliwie zbliżonym do 90° , tj. możliwie prostopadle do mierzonej powierzchni.



Rys. 2. Kątowa zależność emisyjności powłoki srebrowej przy pomiarze dla długości fali $10 \mu\text{m}$ [9]

Współczynnik przenikania ciepła „U” określa ilość ciepła przepływającego w ustalonych warunkach w jednostce czasu przez jednostkę powierzchni szkła powlekanego na jeden stopień różnicy temperatur między otoczeniem wewnętrznym i zewnętrznym. Metody określania wartości współczynnika przenikania ciepła U podają normy PN-EN 673 i PN-EN 674. Do obliczenia wartości współczynnika U niezbędna jest znajomość emisyjności szkła powlekanego, wyznaczonego z pomiarów spektralnych dla zakresu długości fal promieniowania $5,5\text{--}50 \mu\text{m}$ ($5500\text{--}50\,000 \text{nm}$). Zmierzona według normy PN-EN 673 lub PN-EN 12898 możliwie prostopadle do powierzchni szkła przy trzydziestu długościach fali emisyjność normalna ε_n jest dla potrzeb obliczeń dalszych parametrów oszklenia przeliczana na emisyjność skorygowaną, odpowiadającą zastosowaniu szkła z powłoką w szybie zespolonej. Stosuje się w tym celu mnożenie zmierzonych wielkości ε_n przez odpowiadające im wskaźniki podane w odpowiednich załącznikach normatywnych tych norm.

Szkoło płaskie z powłokami niskoemisyjnymi jest powszechnie stosowane w budownictwie jako składnik skutecznie zwiększający termoizolacyjność szyb zespolonych. Aktualnie, powłoki niskoemisyjne pozwalają zmniejszyć emisyjność powierzchni szkła w zakresie długości fal od $5\text{--}50 \mu\text{m}$ od około 0,9 do zakresu poniżej 0,02 do ok. 0,01 [9]. Dla zastosowań wymagają-

cych wysokiej trwałości, najszerzej stosowane są szkła z powłokami otrzymywanymi metodą pirolizy lub CVD na bazie tlenku cyny domieszkowanego fluorem (SnO_2 ; F) lub z tlenku indowo-cynowego (indium-tin oxide, ITO, $\text{In}_2\text{O}_3\text{-SnO}_2$, domieszkowany na poziomie zawartości od ok. 2,5–10%) [2].

Obydwa rodzaje a zwłaszcza powłoki ITO znajdują zastosowanie w urządzeniach elektronicznych i optoelektronicznych (dla ekranów i paneli ciekłokrystalicznych, diod typu OLED, urządzeń fotowoltaicznych, szyb grzewczych i anty-mgielnych) oraz w oszkleniach z powłokami o zaawansowanych funkcjach, jak np. powłoki elektrochromowe czy elektroluminescencyjne. W zależności od właściwości (poziomu domieszkowania i warunków otrzymywania) oraz wymogów dla tego rodzaju urządzeń, domieszkowane powłoki na bazie tlenku cyny i powłoki ITO mogą stanowić warstwy elektroprzewodzące lub półprzewodnikowe.

Przykładowe właściwości i zastosowania szkieł komercyjnych i szkieł z powłokami niskoemisyjnymi

W wyniku ciągłej konkurencji w zakresie prac badawczych nad nowymi rodzajami i właściwościami szkieł z powłokami, światowi wielcy producenci szkieł powlekanych oferują pod różnymi nazwami handlowymi, wyroby zbliżone pod względem parametrów użytkowych. Pozwala to charakteryzować przykładowe komercyjne szkła z powłokami na podstawie ich typowych właściwości, bez konieczności przedstawiania wszystkich wyrobów o podobnych właściwościach, wytwarzanych przez różnych producentów.

W tabeli 1 podano właściwości szkła K-Glass firmy Pilkington, jako przykładowe dla szkieł niskoemisyjnych z twardą pirolityczną powłoką z tlenku cyny domieszkowanego fluorem.

Tabela 1. Pilkington K Glass™ z powłoką pirolityczną, monolityczne i w szybie zespolonej – parametry

Pilkington K Glass	Szyba pojedyncza 4 mm	Szyba zespolona 4 mm-16 mm-4 mm ze szkłem zwykłym
Współczynnik przenikania ciepła U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$]	3,7	1,5
Przepuszczalność światła [%]	82	74
Odbicie światła zewn./wewn. [%]	11/12	17/17
Wskaźnik oddawania barw	99	99
Bezpośrednia przepuszczalność energii słonecznej [%]	71	60
Odbicie energii słonecznej [%]	10	16
Absorpcja energii słonecznej [%]	19	24
Całkowita przepuszczalność energii słonecznej [%]	74	72

W tabeli 2 podano przykładowe właściwości szyb zespolonych z udziałem szkieł z powłokami niskoemisyjnymi nanoszonymi metodą magnetronową. Przykłady dotyczą szkieł produkowanych przez firmę Guardian Industries Corp. (Guardian Częstochowa, Polska).

Tabela 2. Właściwości szyb zespolonych z udziałem wybranych szkielek produkcji firmy Guardian (Guardian Częstochowa, Polska), z powłokami niskoemisyjnym nanoszonymi metodą magnetronową

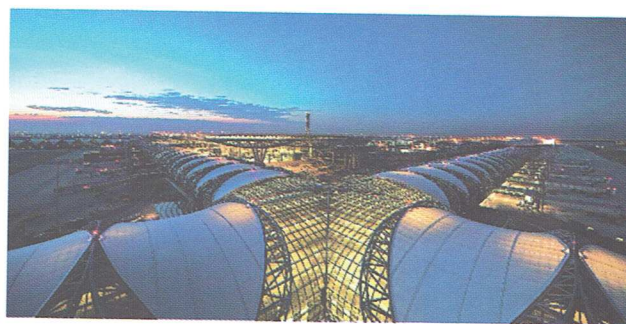
Budowa szyby zespolonej /*	Pozycja powłoki w oszkleniu	Przepuszczalność światła [%]	Odbicie światła [%]	Wskaźnik oddawania barwy R_a	Współczynnik całkowitej przepuszczalności energii słonecznej g wg PN-EN 410 [%]	Współczynnik przenikania ciepła U wg PN-EN 673 (15K) [W/(m ² K)]
4-16-4 (powietrze)	3	80	12	98	66	1,4
4-16-4 (argon)	3	80	12	98	66	1,2
4-16-4 (argon)	2 + 3	78	8	98	57	1,1
4-16-4-16-4 (argon)	2 + 5	71	14	97	53	0,6
4-12-4-12-4 (krypton)	2 + 5	71	14	97	53	0,5
ClimaGuard Premium						
4-16-4 (argon)	3	80	12	97	63	1,1
4-10-4 (krypton)	3	80	12	97	63	1,0
4-14-4-14-4 (argon)	2 + 5	71	15	96	49	0,6
4-12-4-12-4 (krypton)	2 + 5	71	15	96	49	0,5
ClimaGuard Solar						
4-16-4 (argon)	2	66	26	96	42	1,1
4-16-4 (powietrze)	2	60	26	96	42	1,3

*/ wypełnienie gazem 90 %, szkło niskoemisyjne firmy Guardian (Guardian Polska z miękką powłoką nanoszoną magnetronowo);

Barwy widziane przez szkła z powłokami o wskaźnikach R_a zbliżonych do 100 (np. $R_a = 98$ dla szkła ClimaGuard N firmy Guardian) pozostają praktycznie niezmienione, gdyż przepuszczalność widmowa tego rodzaju szkielek w zakresie widzialnym jest zbliżona do szkielek niepowlekanego. Neutralna barwa i wysoka przepuszczalność światła pozwala na optymalne wykorzystanie naturalnego światła dziennego i dzięki temu na oszczędność energii na cele oświetleniowe.

Aktualnie produkowane szkła niskoemisyjne, dzięki nowoczesnym powłokom o zróżnicowanych właściwościach, mogą oprócz korzystnych wartości współczynnika U charakteryzować się też wysokim współczynnikiem całkowitej przepuszczalności energii słonecznej g, tj. zapewniać korzystną izolacyjność termiczną a przy tym, jak np. szkła N i Premium z serii ClimaGuard™ firmy Guardian (odpowiednio, g = 66% i 63%, tab. 1) umożliwiać poprawę bilansu energetycznego budynku dzięki wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego.

Na rys. 3 pokazano przykład zastosowania szkła niskoemisyjnego SUNGATE 500 firmy PPG. Elementy konstrukcyjne z tego szkielek mogą być poddawane przetwórstwu (gięcie, hartowanie i inne). Z kolei rysunki 4 i 5 przedstawiają nowoczesne zastosowania szkielek z powłokami. Zarówno diody LED wbudowane w panel ze szkielek klejonego, jak i powłoka ciekłokrystaliczna i powłoka elektrochromowa zasilane są energią elektryczną z war-



Rys. 3. Port lotniczy Suvarnabhumi, Bangkok, Tajlandia. Przykład zastosowania szkielek niskoemisyjnego SUNGATE 500 Low-E Glass (firmy PPG) z odporną powłoką nanoszoną pirolitycznie, które może być gięte i laminowane a także hartowane i wzmacniane termicznie w celu podwyższenia wytrzymałości mechanicznej (<http://project-gallery.ppg.com/>)

stwy elektroprzewodzącej naniesionej bezpośrednio na podłoże szklane. Na rys. 5 pokazano odpowiednio stan zabarwiony i rozjaśniony szyb w oszkleniu z powłoką elektrochromową. Cykle zabarwiania-rozjaśniania mogą być powtarzane co najmniej kilkadziesiąt tysięcy razy i sterowane są dynamicznie, przez zmianę polaryzacji przyłożonego niewielkiego napięcia stałego. Możliwe jest zatrzymanie dowolnego stanu przejściowego przez pożądaną okres czasu i szyby zarówno w stanach skrajnych jak i przejściowych zachowują pełną przejrzystość.



Rys. 4. Panele ze szkła laminowanego z diodami LED oraz z warstwami ciekłokrystalicznymi (Priva-Lite, Saint Gobain) zasilanymi poprzez warstwę elektroprzewodzącą na szkło, jako przykłady szkieł o funkcjach ulegających dynamicznym zmianom za pośrednictwem sterowania napięciem elektrycznym, (Glasstec, 2008)



Rys. 5. Przykłady zastosowania szkieł z powłokami elektrochromowymi. Powszczególne elementy oszklenia mogą pozostawać w stanie rozjaśnionym (bezbarwnym) lub zabarwionym (w stopniu regulowanym), będąc przy tym przezroczyste, (Econtrol, Architectural products, Flaberg GmbH & Co. KG.)

Ze względu na elektroprzewodzące podłoże powłok elektrochromowych, szkła z takimi powłokami nie tylko regulują przepuszczalność światła i energii słonecznej, lecz także posiadają właściwości niskoemisyjne [1, 7].

Podsumowanie i wnioski

Szeroka i różnorodna pod względem właściwości oraz stale wzbogacana oferta rynkowa szkieł powlekanych dla budownictwa pozwala na kształtowanie przy ich użyciu funkcji oświetleniowych i energooszczędności budynków oraz w znacznym stopniu poszerza możliwości projektowania budynków w sposób pozwalający na dopasowanie wszystkich materiałów i elementów konstrukcyjnych fasad zarówno pod względem użytkowym jak i estetycznym. Umożliwia to także realizację fasad cało-szklanych, w których zarówno zewnętrzne szyby oszkleń okiennych jak i pozostałe elementy konstrukcyjne wykonane są z tego samego rodzaju szkła.

Warunek trwałości szkieł powlekanych stanowi właściwe zastosowanie tych szkieł, determinowane przez metodę otrzymywania powłoki i rodzaj oraz parametry wytrzymałościowe podłoża szklanego.

Miarą postępu w zakresie oszkleń są kolejne generacje szkieł z powłokami. W związku z tym szkła z powłokami dla oszkleń, zwłaszcza w ostatnich latach są przedmiotem szczególnego zainteresowania zarówno ze względów badawczych jak i możliwości praktycznych zastosowań. W świetle aktualnego stanu wiedzy, za szczególnie perspektywiczne uważane są ich zastosowania w nowoczesnych urządzeniach fotowoltaicznych oraz w nowoczesnych oszkleśeniach dla budownictwa i motoryzacji, o charakterze

tw. „inteligentnych oszkleń” („smart” windows), a także dla cienkowarstwowych urządzeń elektronicznych, optoelektronicznych i telekomunikacyjnych, w tym np. na ekrany lamp ekranów, wskaźników obrazowych, dla urządzeń przetwarzania i odtwarzania danych techniką cyfrową, a także w urządzeniach laserowych, ogniwach fotowoltaicznych (w tym ogniwach i kolektorach słonecznych) itp. Należy przy tym podkreślić, że nowatorskie rozwiązania w zakresie szkieł z powłokami opracowywane pod kątem potrzeb nowoczesnej optoelektroniki, np. z dziedziny zastosowań nanotechnologii, w stosunkowo niedługim czasie stają się przedmiotem prób wdrożenia w zaawansowanych oszkleśeniach dla budownictwa i motoryzacji. Obserwowany w ostatnich latach dynamiczny rozwój technik produkcji i przetwórstwa szkła oraz wiedzy w zakresie inżynierii materiałowej i nanotechnologii skutkuje otrzymywaniem szkieł z powłokami i wyrobów na bazie tego rodzaju szkieł w coraz szerszej gamie asortymentowej i dla różnorodnych zastosowań praktycznych.

Zgodnie z obserwowanymi tendencjami, rysującymi się na podstawie prowadzonych prac badawczych, przyszłe szkła z powłokami będą opracowywane zarówno z wykorzystaniem znanych, statycznych właściwości przeciwsłonecznych i niskoemisyjnych, jak i nowych rozwiązań materiałowych i strukturalnych, pozwalających nadawać szkłom z powłokami i samym powłokom nowe funkcje, zwłaszcza kontrolowania właściwości optycznych i innych użytkowych w sposób dynamiczny.

Literatura

- [1] Coatings on Glass, Technology Roadmap Workshop, Livermore, California, January 18–19, 2000, Sandia National Laboratories Livermore, California.
 - [2] G. Frank, E. Kauer, H. Köstlin, *Thin Solid Films*, 77 (1981), 1–3, 107–117.
 - [3] C. M. Lampert, *Sol. Energy Mater.*, 6 (1981), 1–41.
 - [4] *I-Glass International*, 35 (2012) 7, 17–19.
 - [5] J. Karisola, *Glass International*, 35 (2012) 7, 22–23.
 - [6] *I-Glass International*, 35 (2012) 7, 5.
 - [7] L. Michalski, K. Eckersdorf, *Pomiary temperatury*, wyd. 3 (zmienione), Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1986.
 - [8] F. Geotti-Bianchini, J. Lohrengel, *Glastechn. Ber.*, 62 (1989), 9, 312–319.
 - [9] H. Rawson, *Glastechn. Ber.*, 62 (1989), 5, 167–174.
 - [10] P. Polato, F. Geotti-Bianchini, P. Segato, *Glass Technol.*, 27 (1986), 2, 55–59.
 - [11] F. Nicoletti, F. Geotti-Bianchini, P. Polato, *Glastechn. Ber.*, 61 (1988), 5, 127–139.
 - [12] M. A. Ordal, L. L. Long, R. J. Bell et al., *Appl. Optics*, 22 (1983), 7, 1099–1119. [13] M. Rubin, *Sol. Energy Mater.*, 12 (1985), 275–288.
 - PN-EN 674: „Szkło w budownictwie. Określenie współczynnika przenikania ciepła „U”. Metoda osłoniętej płyty grzejnej.”
 - PN-EN 673: „Szkło w budownictwie. Określenie współczynnika przenikania ciepła „U”. Metoda obliczeniowa.”
 - PN-EN 1096-2: „Szkło w budownictwie. Szkło powlekane. Część 2: Wymagania i metody badania powłok kategorii A, B i S.”
 - PN-EN 1096-3: „Szkło w budownictwie. Szkło powlekane. Część 3: Wymagania i metody badania powłok kategorii C i D.”
 - PN-EN 1096-1: „Szkło w budownictwie. Szkło powlekane. Część 1: Definicje i klasyfikacja.”
 - PN-EN 410: „Szkło w budownictwie. Określenie świetlnych i słonecznych właściwości oszkleń.”
 - PN-EN 12 898: „Szkło w budownictwie. Określenie emisyjności”.
- I/-strony Web z materiałami informacyjnymi i broszury dla szkieł powlekanych firm: Pilkington, Guardian, Saint Gobain, AGC, PPG i innych.*

Konferencja Naukowo-Techniczna „Przemysł Szklarski 2012”
Ustroń 10–12.X.2012, (zaprezentowane jako referat)