



Inteligentne szkła

Ł. Nowak ^a, B. Ziębowicz ^b

^a Student Politechniki Śląskiej, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Studenckie Koło Naukowe Nanotechnologii i Materiałów Funkcjonalnych
e-mail: noowaq@gazeta.pl

^b Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny
Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Zakład technologii Procesów
Materiałowych, Zarządzania i Technik Komputerowych w Materiałoznawstwie
e-mail: boguslaw.ziebowicz@polsl.pl

Streszczenie: Praca przedstawia nowoczesną grupę szklanych materiałów inteligentnych. Dokonano podziału oraz charakterystyki pod względem sposobu działania oraz opisano możliwości ich zastosowania.

Abstract: This thesis introduces modern group of glass-smart materials. they have been grouped, characterized and the possibilities of their use have been described.

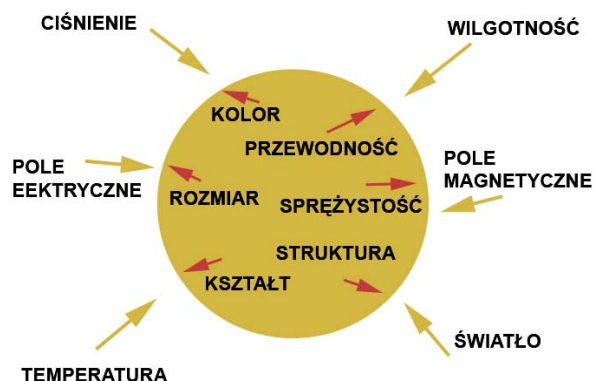
Słowa kluczowe: szkło, szkło aktywne, switchable glass, szkła inteligentne

1. WSTĘP

Już w latach 80 XX wieku zaczęto interesować się materiałami, które określano mianem inteligentnych ze względu na swoje specyficzne cechy. Jednakże pomimo ich ciągłego rozwoju nie wprowadzono powszechnie jednorodnej i akceptowalnej definicji materiałów inteligentnych. Materiały inteligentne często posiadają różne nazewnictwo: intelligent materials, smart materials, adaptive materials a także multifunctional materials. W praktycznym zastosowaniu materiały nazywane inteligentnymi mogą występować samodzielnie lub stanowić komponent pewnej całości konstrukcyjnej lub funkcjonalnej. Materiały inteligentne można zdefiniować jako materiały, które są zdolne do reagowania na bodźce zewnętrzne poprzez istotną zmianę swych własności dla pożądanego i skutecznego odpowiedzenia na te bodźce (rys. 1) [1, 2].

Cała magia materiałów inteligentnych tkwi w ich oddziaływaniu z otaczającym środowiskiem. Projektowane są w celu reagowania na zewnętrzną stymulację tak, aby adaptowały się do warunków zewnętrznych i polepszały swoje własności,

zwiększając trwałość, oszczędzając energię i poprawiając komfort życia odbiorców. Wśród omawianych materiałów można jednocześnie wyróżnić liczne grupy, w zależności od sygnału wywołującego zmianę w materiale. Są to m.in. materiały z pamięcią kształtu, pizoelektryczne, elektryczno - magnetostrykcyjne, elektrochemiczne, światło-wodorowe i inne.



Rys. 1. Możliwości oddziaływania: materiał – otoczenie [2]

W dobie coraz to szybszego rozwoju technologicznego oraz rosnących wymagań w każdej niemalże dziedzinie gospodarki, swoje miejsce znajdują również inteligentne materiały szklane tzw. smart glass. Inteligentne szkło jest najbardziej zaawansowaną technologią w przemyśle szklarskim na miarę XXI wieku. To szkła o zmiennych parametrach optycznych, które można podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwsza z nich charakteryzuje się samoczynną, automatyczną zmiennością parametrów na skutek oddziaływań zewnętrznych, drugą grupę stanowią materiały bardziej zaawansowane technologicznie, w której parametry mogą być regulowane w sposób kontrolowany, niezależnie od zewnętrznych warunków otoczenia [3, 4]. Stosuje się je zarówno do szklenia zewnętrznego jak również w celu ochrony prywatności, zwłaszcza w pomieszczeniach takich, jak sale konferencyjne, szkoleniowe czy biura. Coraz częściej znajdują zastosowanie w przeszkleniach dachowych samochodów, jako lusterka, jak również jako szyby okienne w lotnictwie. Dzięki zastosowaniu inteligentnego szkła można zaoszczędzić koszty ogrzewania, klimatyzacji oraz oświetlenia. Ważnym czynnikiem jest, aby efekt uzyskiwany był w czasie rzeczywistym lub w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Barię krytyczną dla powszechnego stosowania takich rozwiązań są jednak ciągle zbyt wysokie koszty produkcji, które najprawdopodobniej z upływem czasu będą ulegały obniżeniu [5, 6].

1.1. Klasyfikacja szkła inteligentnego

Zmiany własności następują w wyniku oddziaływania zróżnicowanych czynników zewnętrznych, które pozwalają sklasyfikować szkło aktywne w następujących grupach:

- szkło fotochromatyczne – jego zmiana przepuszczalności jest funkcją dawki nasłonecznienia,
- szkło termochromatyczne – zmiana przepuszczalności szkła odpowiada na zróżnicowane wartości temperatury szklenia,
- szkło termotropowe – całkowita przepuszczalność energii słonecznej zmniejsza się wraz ze wzrostem rozproszenia światła widzialnego w pewnym zakresie wartości temperaturowych,
- szkło elektrochromatyczne, elektrooptyczne – własności optyczne zmieniają się pod wpływem oddziaływania prądu elektrycznego,
- szkło gazochromatyczne – zmiana własności optycznych zachodzi dzięki wykorzystaniu mieszanki gazowej wewnątrz systemu [3].

Podział ten można przedstawić za pomocą schematu (rys. 2) [3].



Rys. 2. Klasyfikacja szkła aktywnego [3]

Celem pracy jest szersze przedstawienie najciekawszych osiągnięć przemysłu szklarskiego w ostatnich latach. Szczególnie interesującym typem szkła spośród wymienionych wcześniej są inteligentne szkła elektrochromatyczne, które ze względu na możliwość regulacji przezroczystości zyskują coraz to szersze zastosowanie.

2. CHARAKTERYSTYKA WYBRANYCH GATUNKÓW SZKIEŁ INTELIGENTNYCH

2.1. Szkło elektrochromatyczne

Jednym z ciekawszych rozwiązań „jutra” jest technologia szklenia, o dających się regulować, zmiennych własnościach przepuszczalności promieniowania słonecznego. Szkła te należą do grupy materiałów inteligentnych zmieniających kolor. Ich cechą charakterystyczną jest elektrochromizm, czyli zdolność do odwracalnych zmian optycznych

w wyniku przepływu elektronów. Pierwszy raz elektrochromizm zaobserwowano w trójtlenku wolframu WO_3 w 1969 roku, który po dzień dzisiejszy jest najczęściej i najchętniej używanym materiałem elektrochromowym. Zmiany optyczne polegają na widzialnej zmianie koloru. Przemiana ta może zachodzić z substancji bezbarwnej do zabarwionej lub jako przemiana typu kolor – kolor. Zastosowanie tego typu szkła dzięki kontroli światła i ciepła słonecznego może wpłynąć na zmniejszenie konsumpcji energii elektrycznej w budynkach nawet do 30%. Mogą również mieć pozytywny wpływ na komfort użytkownika pomieszczeń zapewniając więcej prywatności [1, 7, 8].

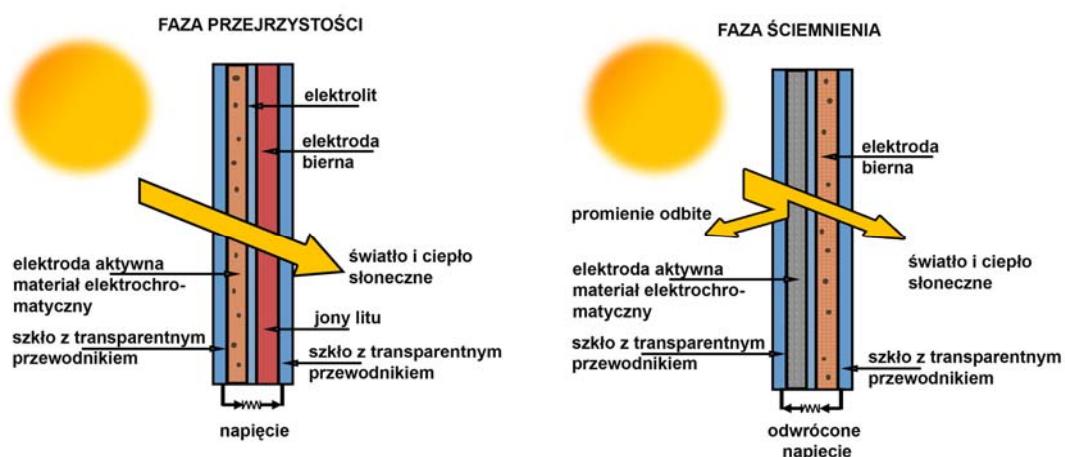
Działanie szkła elektrochromatycznego polega na wykorzystaniu materiałów elektrochromatycznych, które tworzą jego powłokę. Materiały te zmieniają swoje własności optyczne na skutek działania napięcia elektrycznego, czyli posiadają zdolność do pozyskiwania i oddawania jonów, co decyduje o ich przepuszczalności. Szyba elektrochromatyczna składa się z pięciu aktywnych warstw (rys. 3) [1].



Rys. 3. Warstwy szyby elektrochromatycznej [1]

Powłoka magazynująca jony tzw. elektroda przeciwna (bierna), materiał zapewniający przepływ jonów, czyli elektrolit oraz materiał elektrochromatyczny tzw. elektroda „pracująca” (aktywna) umieszczone są pomiędzy dwiema zewnętrznymi taflami szkła z transparentnymi przewodnikami. Na skutek przyłożonego napięcia zachodzi reakcja chemiczna wraz z przepływem jonów. Ściemnianie następuje poprzez odpływ jonów z powłoki pracującej, elektrochromatycznej, do powłoki magazynującej. W wyniku zmiany kierunku pola elektrycznego następuje powrót jonów do powłoki aktywnej, dzięki czemu stają się ona ponownie aktywna. Dzięki czasowemu naładowaniu powłok, przyłożenie napięcia jest wymagane wyłącznie podczas procesu przepływu jonów (rys. 4). Zmiana koloru jest uzależniona od szybkości przemieszczania się jonów w warstwie elektrolitu.

Najczęściej na aktywną, tzw. pracującą elektrodę, wykorzystywany jest trójtlenek wolframu WO_3 charakteryzujący się dużą rozpiętością parametrów przepuszczalności światła. Szklenie w fazie zaciemnienia uzyskuje ciemno-niebieską barwę. Zastosowanie innych materiałów umożliwia uzyskanie innych kolorów szklenia w fazie ściemnienia, np. brązu (NiO), czerni (IrO_2).

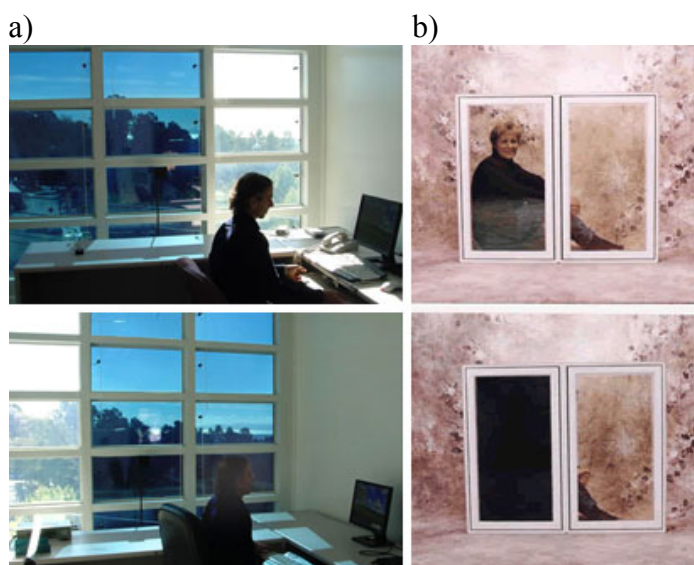


Rys. 4. Schemat budowy i zasady działania szkła elektrochromatycznego [7]

Uruchamianie systemów elektrochromatycznych może być wykonywane ręcznie lub automatycznie. Inteligentne szyby, które stają się ciemne po naciśnięciu przycisku (włączenie obwodu elektrycznego) zapewniają redukcję strat ciepła oraz zapobiegają przed przegrzaniem pomieszczenia a zarazem stwarzają bardziej komfortowe warunki użytkowania. Obniżenie przejrzystości może wynosić od 5-80%, a wymagane napięcie wynosi zaledwie 1-5V i jest niezbędne jedynie do zmiany stanów a nie do ich podtrzymywania [7, 8].

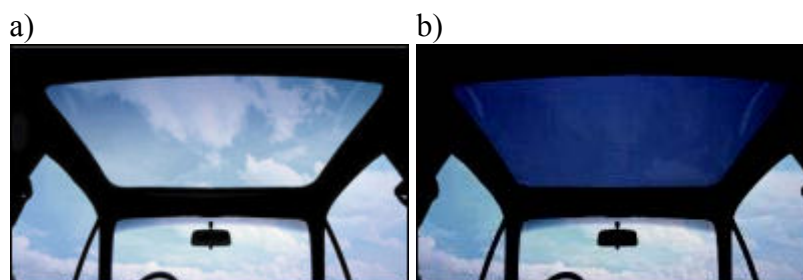
Do zalet szkła elektrochromatycznego można zaliczyć:

- małe zapotrzebowanie napięciowe (1-5 V),
- zasilanie jedynie podczas przełączania stanów przejrzystości,
- płynne przejście zmian przejrzystości,
- ochronę przed niszczącym promieniowaniem ultrafioletowym,
- długoterminową pamięć (12-48 h).



Rys. 5. Przeszklenia okienne elektrochromatyczne: a) możliwość przełączenia przeszklenia, b) góra – stan przezroczystości, dół – stan zaciemnienia [6]

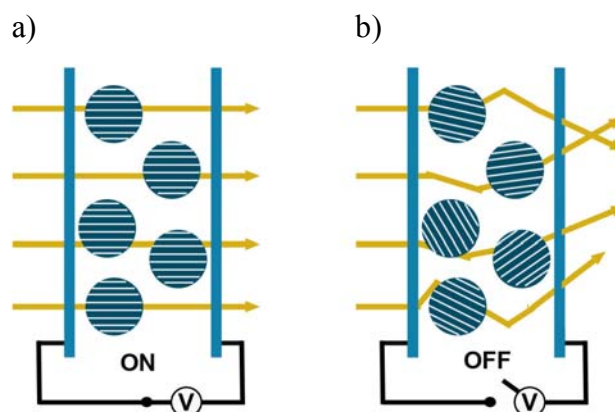
Szkła elektrochromatyczne wykorzystywane są do szklenia budynków (rys. 5), wykończenia wnętrz oraz jako przeszklenia dachowe samochodów (rys. 6), a także na lusterka wsteczne, gdy kierowca jest oślepiany światłami, jednym przyciskiem może przyciemnić ich kolor.



Rys. 6. Szkło elektrochromatyczne w przeszkleniu samochodu: a) stan przezroczystości, b) stan ograniczenia przezroczystości [6]

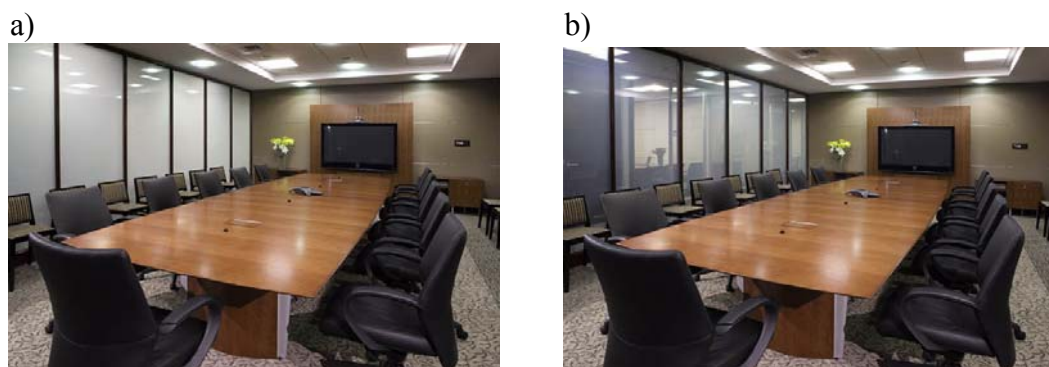
2.2. Szkło elektrooptyczne

Szkło elektrooptyczne również należy do grupy szkieł nowej generacji tzw. switchable glass. Technologia ta oparta jest na wykorzystaniu ciekłych kryształów (LC). Własności szkła ulegają zmianie podczas przyłożenia napięcia elektrycznego, co gwarantuje regulację zależną jedynie od użytkownika, a nie od pogody lub innych czynników zewnętrznych, takich jak temperatura. Typem takiego rozwiązania są szkła laminowane, składające się z dwóch szkieł białych lub kolorowych oraz dwóch folii, pomiędzy którymi umieszczona jest folia LC, umożliwiającą zmianę przepuszczalności szkła pod wpływem napięcia elektrycznego. W stanie niepodłączonym do prądu, ciekłe kryształy znajdujące się w folii są zorientowane w sposób chaotyczny, co powoduje matowy wygląd szkła. W wyniku zasilania prądem elektrycznym następuje polaryzacja cząstek, w wyniku czego szkło staje się całkowicie przezroczyste (rys. 7) [6, 8, 9].

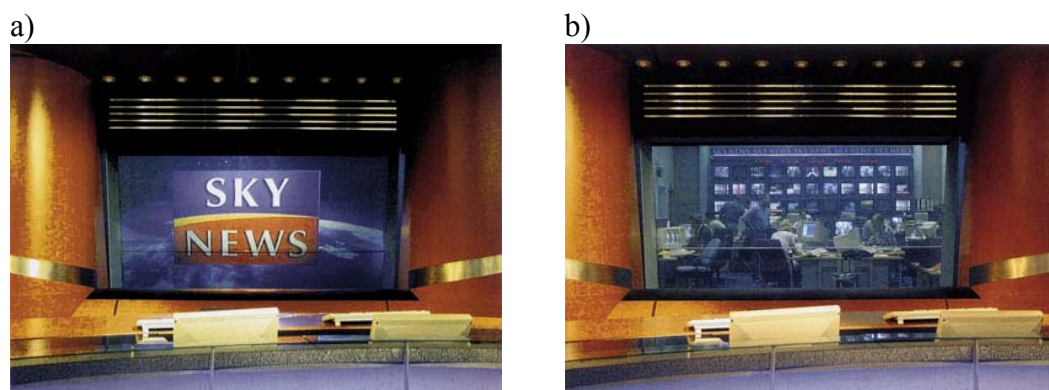


Rys. 7. Zmiana przepuszczalności szkła: a) stan przezroczysty, b) stan nieprzezroczysty [6]

Kilka wiodących firm produkujących szkła w Polsce już oferuje swoje produkty o takich możliwościach. Są one jednak głównie przeznaczone do zastosowań wewnętrznych jako przeszklenia biurowe, lub sale konferencyjne (rys. 8). Pewnym problemem w zastosowaniach jest maksymalna wielkość tafli, która może wynosić ok. 1 x 3 m a więc niedostatecznie duża do zastosowań zewnętrznych. Ciekawym rozwiązaniem dla tego typu szkła jest możliwość wykorzystania jego powierzchni do projekcji obrazu. Taką właśnie innowację zastosowało studio telewizyjne Sky News jako jedną ze swoich ścian (rys. 9).



Rys. 8. Przeszklenia elektrooptyczne zastosowane w sali konferencyjnej, a) stan nieprzezierny, b) stan przezierny [4]



Rys. 9. System zastosowany jako ściana w studio telewizyjnym Sky News: a) pozycja off z projekcją obrazu, b) pozycja on (fot. GLASPOL) [9]

2.3. Szkło gazochromatyczne

Szkło gazochromatyczne to kolejny typ szkła zaliczanego do grupy switchable glass, którego przepuszczalność światła i energii można aktywować. W szklach tego typu, do których zaliczają się również szkła elektrochromatyczne, upatruje się rozwiązań stanowiących połączenie skutecznej i efektywnej ochrony przed przegrzewaniem i olśnieniem z tradycyjną rolą okna spełniającą funkcję doświetlającą oraz zapewniającą kontakt

z otoczeniem. Efekt działania szkła gazochromatycznego jest podobny do szkła elektrochromatycznego. Odmienna jest natomiast budowa i zasada funkcjonowania. Dzięki swojej prostej budowie to rozwiązanie postrzegane jest przez niektórych jako najbardziej obiecująca koncepcja technologii switchable.

Działanie przeszkleń gazochromatycznych w celu ściemniania wykorzystuje własności mieszanki gazowej, eliminując potrzebę wykorzystania prądu elektrycznego, co ma miejsce w przypadku szkła elektrochromatycznego. Zabarwienie szkła determinowane jest poprzez aktywny gaz przepływający przez pustkę pomiędzy warstwami szkła, który reaguje ze specjalną powłoką naniesioną na wewnętrzną część powierzchni szklanej, w efekcie powodując jej zabarwienie na kolor niebieski lub powrót do koloru neutralnego (rozjaśnianie) (rys. 10).

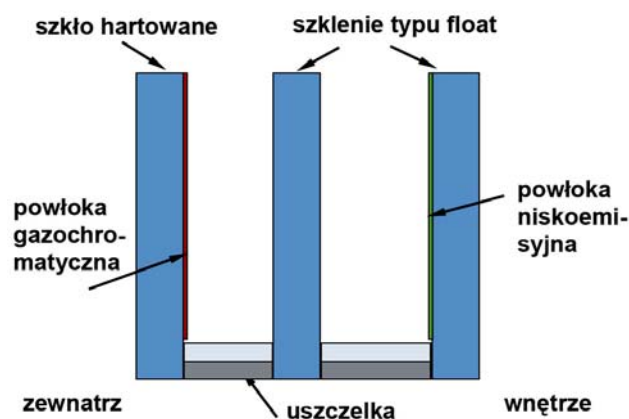


Rys. 10. Okno ze szkleniem gazochromatycznym (góra: faza ściemniona; dół: faza spoczynku) [10]

W celu zabarwienia szkła do powłoki aktywnej optycznie, naniesionej na powierzchnię szklaną, dodawany jest rozcieńczony wodór. Taki komponent o grubości poniżej 1 μm stanowi ciekłą porowatą powłokę trójtlenku wolframu. Jego użycie eliminuje potrzebę stosowania transparentnych elektrod i warstw przewodzących jony, jak ma to miejsce w szklach elektrochromatycznych. Powłoka ta jest dodatkowo pokryta ciekłą warstwą katalizatora i naniesiona od środka na powierzchnię szyby zewnętrznej. Wystawiona na oddziaływanie rozcieńczonego wodoru ulega zabarwieniu na niebiesko, zmniejszając wartość przepuszczalności światła oraz energii słonecznej. Przywrócenie przejrzystości uwarunkowane jest oddziaływaniem tlenu.

Zestaw szkła gazochromatycznego składa się ze szkła właściwego w postaci szyb izolacyjnych oraz podłączonego do szklenia systemu dopływu gazu. Jednostka kontroli dopływu gazu pozwala zarówno na manualną jak i automatyczną kontrolę. Szklenie gazochromatyczne może być produkowane jako układ dwuszybowy (DGU) lub trójszybowy (TGU) (rys. 11). W rozwiązaniu dwuszybowym zewnętrzną warstwę z powłoką gazochromatyczną stanowi szkło hartowane, wewnętrzną natomiast szkło typu float. Ich wartości przepuszczalności światła wynoszą od 67-16%, a energii słonecznej od 60-12%. Zestawy trójszybowe stosowane są w obrębie przegród zewnętrznych wymagających

lepszych właściwości termoizolacyjnych. Dodatkowo na powierzchni szyby znajdującej się od strony pomieszczenia znajduje się powłoka niskoemisyjna. Wartości przepuszczalności światła wynoszą od 60-11% [10].

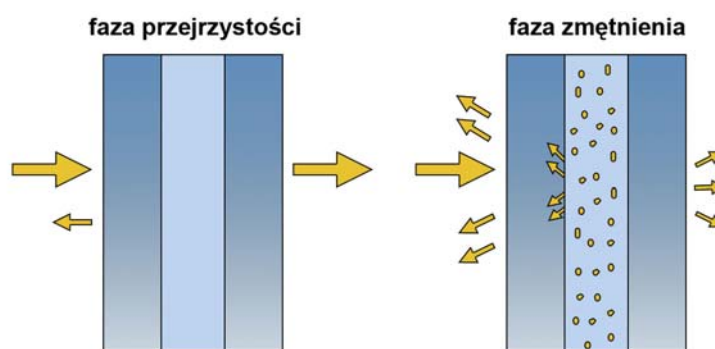


Rys. 11. Budowa przegrody ze szkleniem gazochromatycznym jako zestawu trójszybowego [8]

Szklenie gazochromatyczne w stanie pełnego ściemnienia daje możliwość osiągnięcia zredukowania zysków słonecznych ok. 3-krotnie w porównaniu do stanu spoczynku, co daje duże możliwości ochrony przed przegrzaniem pomieszczeń, zmniejszając jednakże przepuszczalność światła słonecznego. Problem polega na znalezieniu właściwej równowagi w sensie komfortu termicznego i wizualnego pomiędzy przepuszczalnością światła i ciepła słonecznego [10].

2.4. Szkło termotropowe

Szkło termotropowe zaliczane jest do grupy rozwiązań charakteryzujących się samoczynną zmiennością parametrów na skutek oddziaływań zewnętrznych. Wykorzystywane są tutaj powłoki aktywne temperaturowo, inaczej wrażliwe na pasmo podczerwieni. Powłoki tego typu charakteryzują się automatyczną zdolnością przepuszczania światła w wyniku odwracalnych zmian fizycznych wywołanych zmianą temperatury. Termotropowe powłoki funkcjonują w zakresie całego widma słonecznego, co umożliwia zmianę stanu od przejrzystego i przepuszczającego światło do całkowicie nieprzepuszczalnego. W niższych temperaturach zestaw szkła jest jednorodny i silnie przezroczysty, natomiast w wyższych temperaturach następuje samoczynne ściemnianie szklenia. Taki efekt uzyskuje się dzięki wykorzystaniu własności materiałów termotropowych. Materiał termotropowy składa się z dwóch różnych składników o różnych wskaźnikach refrakcyjnych. Zestaw taki może stanowić połączenie np. wody i polimeru (hydrożel) lub dwóch różnych polimerów (mieszanka polimerowa). Zmienność zabarwienia następuje poprzez zmianę konfiguracji polimerów, która ulega zróżnicowaniu w efekcie oddziaływania temperatury od rozciągniętych łańcuchów po zgrupowania hamujące przenikanie światła (rys. 12) [3].



Rys. 12. Schemat działania szklenia termotropowego [3]

Jak wskazują badania istnieje jeszcze szereg ograniczeń uprzemysłowienia technologii szklenia termotropowego. Uprzemysłowienie takiego rozwiązania wymaga spełniania szeregu postulatów:

- zastosowania substancji i systemów, tworzących powłokę termotropową, odpornych na promieniowanie UV, tanich, dostępnych w dużych ilościach, nieszkodliwych dla zdrowia i środowiska naturalnego,
- osiągnięcia zmętnienia na całej powierzchni bez zauważalnych smug, pól nieaktywnych oraz w tempie akceptowalnym dla ludzkiego oka,
- temperatura towarzysząca przemianie fazowej powinna mieścić się w przedziale 30-80°C,
- zapewnienie wysokiej powtarzalności procesu przemiany fazowej bez wyraźnego wpływu na obniżenie jakości produktu.

Wyeliminowanie powyższych niedogodności poszukuje się w rozwiązaniach z użyciem polimerów-hydrożeli oraz mieszanek polimerowych.

Uważa się, iż szkło termotropowe znajdzie zastosowanie w budynkach, które nie wymagają ciągłej transparentności przeszklenia np. szklenia dachów, świetlików, a także elewacji w obiektach handlowych lub przemysłowych.

2.5. Szklą fotochromatyczne

Szklą fotochromatyczne w odróżnieniu od szkieł termotropowych ulegają zmianom cech optycznych pod wpływem oddziaływania światła. Wynika to z zastosowania powłok fotochromatycznych aktywnych na pasmo ultrafioletu. Podczas oddziaływania pasma ultrafioletowego lub krótkiego pasma widzialnego przepuszczalność światła maleje automatycznie. Powrót do stanu przezroczystości następuje po odcięciu dopływu światła na powierzchnię szkła. Działanie takiej przemiany oparte jest na wykorzystaniu procesu fotochromatycznego wykorzystującego odwracalną przemianę zachodzącą we wbudowanych kryształkach halogenku srebra. Stopień zaciemnienia zależy od intensywności światła i zachodzi bardzo szybko. Do zalet tego typu szkła zalicza się wysoką trwałość i odporność na związki chemiczne.

Najczęściej ten rodzaj szkła jest wykorzystywany w przemyśle optycznym, jednakże podejmowane są próby wdrożenia tego typu przeszklenia w aplikacjach budowlanych. Mimo trwających prac nad uprzemysłowieniem tej technologii w oszkleniach wielkopo-

wierzchniowych wciąż pozostaje on w fazie prototypowej, ze względu na ograniczenia technologiczne dotyczące gabarytów powierzchniowych. Szkło fotochromatyczne spełnia swoje funkcje w małych przeszkleniach np. w okularach, natomiast w większej skali, np. jako przeszklenia okienne, jego działanie nie jest zadowalające. Problemy wynikają z braku płynności i równomierności przemiany fazowej a także słabym zabarwieniu w wyższych temperaturach.

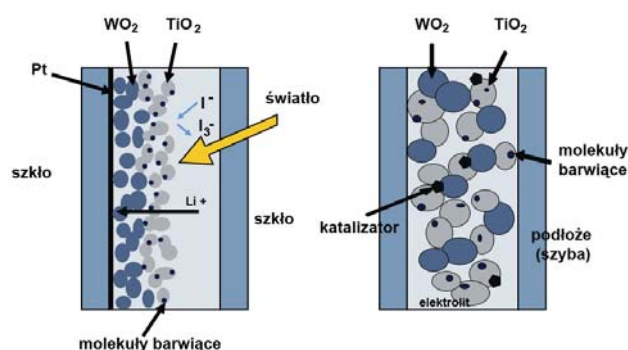
Prace badawcze, mające na celu ulepszenie tych szkieł, prowadzone są między innymi w Instytucie Fraunhofera w Freiburgu (Niemcy), gdzie w ostatnim czasie jednostki badawcze poinformowały o udanej próbie wytworzenia produktu fotochromatycznego, szczególnie przydatnego w budownictwie. Koncepcja rozwiązania opiera się na połączeniu elektrochemicznego tlenku wolframu i barwiącej powłoki komórki słonecznej. Podczas oddziaływania światła słonecznego na szkło, próbka fotochromatyczna ciemnieje tzn. przepuszczalność w paśmie widzialnym maleje z 60% do 4% (rys. 13).



Rys. 13. Próbkki szklenia fotochromatycznego opracowanego w Instytucie Fraunhofera [3]

Mechanizm ten polega na pobudzaniu molekuł barwiących pod wpływem oświetlenia, w wyniku czego molekuły wprowadzają elektrony poprzez warstwę dwutlenku tytanu (TiO_2) do trójtlenku wolframu (WO_3). W efekcie końcowym trójtlenek wolframu zabarwia się na niebiesko. Powrót do fazy przejrzystości odbywa się wraz z powrotnym przepływem elektronów z WO_3 do jonów jodu (I) w elektrolicie. Reakcja powrotna jest bardzo powolna, lecz dzięki zastosowaniu katalizatora np. platyny (Pt) można ją w znacznym stopniu przyspieszyć (rys. 14) [3, 11].

Im silniejsze działanie katalizatora tym szybciej przebiega proces rozjaśniania. Wadą, która może stanowić ograniczenie do wprowadzenia na rynek, jest samoczynne ciemnienie szkła zarówno latem i zimą. Szklenie fotochromatyczne w przegrodach budowlanych nadaje się do redukcji efektu olśnienia od nasłonecznienia, jednakże nie stanowi dobrego rozwiązania w rozumieniu kontroli zysków cieplnych. Taki system można uznać za korzystny dla okresów letnich, gdy system automatycznie ciemnieje, lecz niepraktyczny zimą, gdyż sposób jego działania jest całkowicie przeciwny do potrzeb grzewczych pomieszczeń budynków. Obecnie opracowywane są nowatorskie rozwiązania, których celem jest eliminacja wspomnianych niedogodności [3, 11].



Rys. 14. Zasada działania szklenia fotochromatycznego opracowanego w Instytucie Fraunhofera w zestawie dwuszybowym (z lewej) oraz jako pojedyncza warstwa [3]

3. PODSUMOWANIE

Nowoczesne szkło, które można włączyć lub wyłączyć w jednej chwili, znajduje coraz to szersze zastosowanie jako przeszklenia fasad zewnętrznych, gabinetów, miejsc użyteczności publicznej, samolotów, pociągów czy samochodów. Zasadą ich działania jest wykorzystanie zmienności fizycznych. Dodatkową zaletą szkła inteligentnego jest możliwość pracy jako ekranu i wyświetlania na nim obrazu z projektora multimedialnego. Rozwiązania typu switchable glass stanowią ochronę przed olśnieniem i przegrzaniem oraz jednocześnie mają spełniać tradycyjną rolę okna jako przegrody doświetlającej i zapewniającej kontakt wizualny z otoczeniem. Zastosowanie odpowiednio dobranego typu szklenia może wpłynąć na redukcję zużycia energii elektrycznej w budynkach a także na komfort użytkowania pomieszczeń. Niestety bariera wysokich kosztów i wciąż istniejących ograniczeń technologicznych tj. wielkość tafli, uniemożliwia rozpowszechnienie tego typu rozwiązań w sposób masowy. Jednakże dzięki ciągłym badaniom oraz szybkości zmian zachodzących na rynku można spodziewać się, iż w przeciągu kilku, kilkunastu najbliższych lat systemy tego rodzaju staną się całkowicie ekonomicznie opłacalne i dostępne dla wszystkich [4, 7, 9, 10].

LITERATURA

1. www.matint.pl
2. A. Ćwikła, Medyczne zastosowanie materiałów inteligentnych, *Science Bulletin of Chełm, Section of Technical Sciences*, 1/2008.
3. J. Marchwiński, Szkło termotropowe i fotochromatyczne w budownictwie, *Świat Szkła* 12/2007.
4. www.walewskaanna.com
5. www.electrochromatic.com
6. www.wartaglass.com
7. J. Marchwiński, Szklenie elektrochromatyczne w budownictwie, *Świat Szkła* 3/2007.
8. K. Zielonko-Jung, Możliwości technologiczne szkła a poszukiwanie rozwiązań proekologicznych, *Świat Szkła* 2/2007.
9. K. Zielonko-Jung, Interaktywne, adaptacyjne, multimedialne – elewacje przyszłości, *Świat Szkła* 2008.
10. J. Marchwiński, Szklenie gazochromatyczne w budownictwie, *Świat Szkła* 6/2007.
11. www.ise.fhg.de