

# Identyfikacja zjawiska powstawania przebarwień na powłoce niskoemisyjnej szkła stosowanego w szybach zespolonych i jego eliminacja

MGR INŻ. SŁAWOMIR PABIAN, MGR INŻ. JOANNA RYBICKA-ŁADA,  
MGR INŻ. ANDRZEJ MUCHA

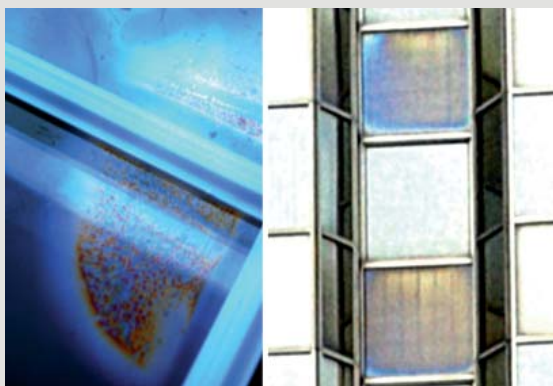
INSTYTUT CERAMIKI I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH, ODDZIAŁ SZKŁA I MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH W KRAKOWIE, ZAKŁAD TECHNOLOGII SZKŁA

Wzrost zainteresowania budownictwem energooszczędnym w ostatnich kilku dziesięcioleciach spowodował, że tradycyjne okna zastępuje się nowoczesnymi konstrukcjami, które wykorzystują szyby zespolone. Zwiększony popyt na tego rodzaju produkty powoduje szybki wzrost podaży zarówno ze strony producentów szyb zespolonych, jak też ze strony dostawców komponentów, wchodzących w skład konstrukcji szyb zespolonych. Różnice w technologiach produkcyjnych oraz znaczna ilość różnego rodzaju komponentów mogących mieć zastosowanie w budowie szyb zespolonych to czynniki mające istotny wpływ na jakość wytworzonego produktu. Ponadto, po zamontowaniu w budynku, szyby te mogą być poddane różnym oddziaływaniom środowiska, zależnie od miejsca ich użytkowania.

## Przedmiot i metodyka badań

Niniejsze opracowanie dotyczy zjawiska występowania przebarwień na powłoce niskoemisyjnej szkła od strony wewnętrznej szyby zespolonej. Zjawisko to od kilku lat obserwowane jest na szybach użytkowanych w różnego rodzaju budynkach (fot. 1), a jego skutkiem jest często wymiana szyb na nowe, co obciąża producentów stratami finansowymi z tytułu reklamacji.

Jednym z obiektów badawczych, mających pomóc w poznaniu zjawiska, była szyba zespolona posiadająca



Fot. 1. Przykład wystąpienia przebarwienia na szybie zespolonej ze szprosami (strona lewa) oraz na szybach zamontowanych na elewacji budynku (strona prawa)

## SŁOWA KLUCZOWE

szyby zespolone, powłoka, wada, odbarwienie, związki lotne

## KEYWORDS

insulated glass units, IGU, coating, discoloration, volatile compounds

## Sławomir Pabian



s.pabian@icimb.pl

Technolog w Zakładzie Technologii Szkła Oddziału Szkła i Materiałów Budowlanych w Krakowie Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Specjalizuje się w badaniach homologacyjnych szyb dla motoryzacji.

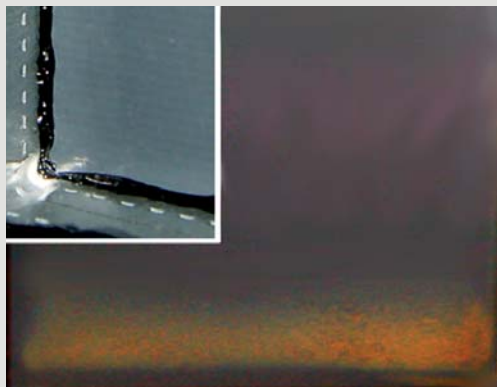
## STRESZCZENIE

W artykule przeanalizowano różnego rodzaju szyby zespolone, które wcześniej stanowiły część elewacji budynków. W pierwszym etapie skupiono się na poznaniu charakteru wady. Sprawdzono, jaki wpływ na odbarwienia mają warunki klimatyczne, procesy fizyczne (mostki termiczne w szybach zespolonych) oraz czy ten rodzaj wady ma charakter trwały. Badania porównawcze składu chemicznego kawałków szkła z wadą na powłoce oraz kawałków szkła bez wady, pozwoliły na identyfikację pierwiastków powodujących odbarwienie na powłoce niskoemisyjnej. W kolejnych etapach pracy przeprowadzono badania różnych komponentów szyb zespolonych, które mogą przyczynić się do powstawania odbarwienia. Dzięki temu zidentyfikowano elementy, które w większym lub mniejszym stopniu są odpowiedzialne za to zjawisko. W celu znalezienia sposobu na minimalizację lub całkowitą eliminację efektu odbarwienia, przeprowadzono badania szyb zespolonych o różnych konstrukcjach. W zależności od konstrukcji szyby zespolonej, oszacowano większe lub mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia wady.

## SUMMARY

### Identification of the phenomenon of discoloration on Low-E coating of glass pane used in insulated glass units and its elimination

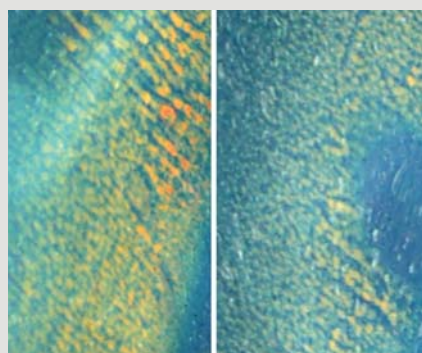
The article analyses different types of insulated glass units, which had been previously for some time a part of the facade of buildings. The first stage focuses on understanding the nature of the defect. There was checked influence of climatic conditions and physical processes (thermal bridges in IGU) on discoloration, and whether this type of defect is permanent. Comparative studies of the chemical composition of glass pieces with defect on the coating, and pieces of glass without the defects, have allowed the identification of elements causing discoloration on the Low-E coating. Subsequently in the next stages of work research of various components of IGU which may contribute to the formation of discoloration were carried out. As a result components responsible for this phenomenon were identified. In order to find a way to minimize or entirely eliminate discoloration effect research of different types of IGU were carried out. Depending on the IGU construction probabilities of defect occurrence were estimated.



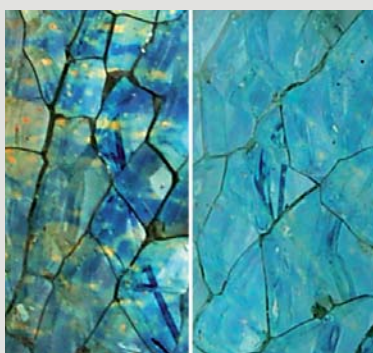
Fot. 2. Zszyba zespolona będąca przedmiotem badania, z widoczną wadą na powłoce niskoemisyjnej oraz rozplywem wewnętrznej masy uszczelniającej

Tabela 1. Skład pierwiastkowy zbadany w mikroobszarach szkła bez wady oraz z wadą

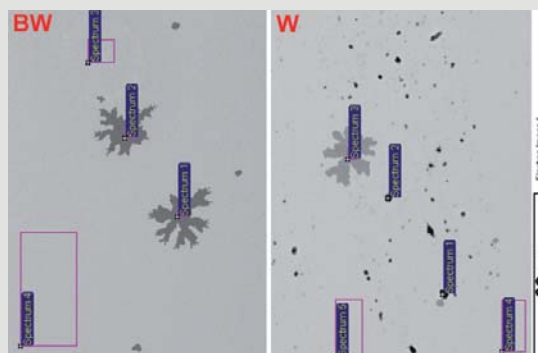
Próbka (mikroobszar)	Skład pierwiastkowy [% mas.]									
	C	O	Mg	Si	Ca	S	Ti	Zn	Ag	Sn
Fot. 9 BW (1)	1,1	39,2	1,7	20,3	2,8		0,6	22,2	2,5	9,6
	1,5	39,3	1,6	20,1	2,7		0,7	22,0	2,5	9,6
	1,2	35,5	1,5	18,8	2,4		0,8	22,2	7,7	9,9
	1,2	35,6	1,6	18,6	2,7		0,9	22,3	7,8	9,3
Fot. 10 W (1)	57,1	19,9	0,4	5,0	1,2	0,3	0,3	9,4	2,7	3,7
	50,9	18,2	0,5	6,9	0,8	0,2	0,6	11,9	4,4	5,5
	3,9	39,0	1,6	19,4	2,6		0,9	21,4	2,2	9,1
	3,4	35,8	1,5	18,1	2,3		0,8	21,5	7,0	9,6
	3,3	35,7	1,5	18,1	2,4		0,8	21,4	7,3	9,5



Fot. 3. Odbarwienie na powłoce niskoemisyjnej (strona lewa) oraz jego zanik w miejscu przetarcia (strona prawa)



Fot. 4. Odbarwienie na powłoce niskoemisyjnej (strona lewa) i jego zanik po przeprowadzeniu wygrzewania próbki (strona prawa)



Fot. 5. Mikroobszary zaznaczone na próbce bez wady (BW - strona lewa) oraz na próbce z wadą (W - strona prawa)

przebarwienie na powłoce niskoemisyjnej. Zszyba była poddana badaniu po 6 latach użytkowania.

W dolnej części szyby o zabarwieniu neutralnym, wchodzącej w skład zespolenia oraz w mniejszym stopniu na całej długości prawego boku tej szyby, widoczny był barwny nalot od strony wewnętrznej (fot. 2). W górnej i dolnej części lewego boku (na narożnikach), w środkowej części górnego boku oraz w górnej i dolnej części prawego boku, widoczne były wewnętrzne rozplywy masy uszczelniającej (fot. 2).

Rozplywy masy uszczelniającej wewnątrz zespolenia pojawiły się wskutek wysokiej temperatury, występującej w przestrzeni międzyszybowej podczas ekspozycji słonecznej. Zjawisku temu sprzyja niekorzystna konstrukcja zespolenia, którego druga tafla szklana została pokryta emalią w ciemnym kolorze na pozycji #3 (tafla szkła od strony wewnętrznej budynku, od strony przestrzeni międzyszybowej). Powłoka niskoemisyjna na pozycji #2 (tafla szkła od strony zewnętrznej budynku, od strony przestrzeni międzyszybowej) dodatkowo powoduje powstanie efektu cieplarnianego w przestrzeni międzyszybowej. Energia słoneczna jest absorbowana przez taflę szklaną pokrytą emalią, a następnie drogą promieniowania jest odprowadzana do wnętrza pakietu.

Odprowadzenie jej nadmiaru na zewnątrz jest utrudnione ze względu na obecność powłoki niskoemisyjnej. Powoduje to powstawanie tak zwanego „efektu cieplarnianego”. Ponadto, wyższa temperatura powoduje zwiększenie plastyczności mas uszczelniających, co prowadzi do utraty hermetyczności szyby zespolonej. Potwierdzenie tego faktu – w przypadku badanej szyby – stanowi badanie zawartości argonu metodą chromatografii gazowej, które wykazało zawartość argonu w przestrzeni międzyszybowej na poziomie 4%.

Wstępne sprawdzenie charakteru wady na powłoce niskoemisyjnej, miało na celu określenie czy odbarwienie na powłoce ma charakter trwały (korozja), czy przejściowy (nalot). W związku z tym wykonano 2 eksperymenty:

#### a) Przetarcie wady tkaniną bawełnianą

Po wykonaniu tej czynności stwierdzono zanik odbarwienia w miejscu przetarcia (fot. 3).

#### b) Wygrzewanie próbki z wadą na powłoce niskoemisyjnej

Szybę hartowaną z widocznym odbarwieniem rozbito i przygotowano próbki do niniejszego eksperymentu oraz do badania w mikroskopie skaningowym. Jedną z próbek wygrzewano w temperaturze 40°C przez 24h. Stwierdzono znaczny zanik odbarwienia na całej powierzchni próbki (fot. 4).

Wskazuje to, że wada na powłoce niskoemisyjnej nie ma trwałego charakteru, ponieważ jest usuwalna przez przetarcie miękką tkaniną. Można również zaobserwować jej zanik po dłuższym nagrzewaniu.

Badania składu chemicznego próbki z przebarwieniem wykonano w próżni LV (low vacuum) przy użyciu skaningowego mikroskopu elektronowego JSM6460LV firmy JEOL z analizatorem rentgenowskim INCAx-ACT350 firmy Oxford Instruments. Badania przeprowadzono w próżni LV. Badaniu poddano próbkę szkła z powłoką bez wady oraz próbkę szkła, na którego powłoce widoczna była wada.

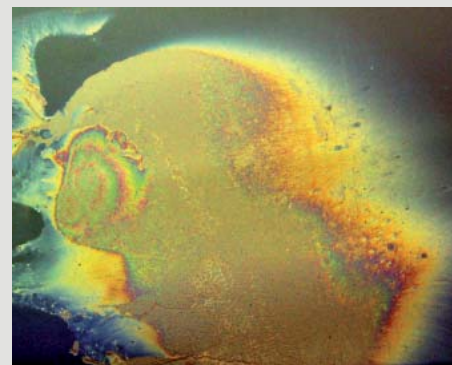
Na fotografii 5. przedstawiono badane próbki z zaznaczonymi mikroobszarami, na których oznaczono skład pierwiastkowy. Znak „BW” symbolizuje próbkę bez wady, natomiast znak „W” próbkę z wadą na powłoce. Skład pierwiastkowy badanych elementów



Fot. 6. Próbkę mas uszczelniających, zamknięte w przestrzeni międzyszybowej specjalnie przygotowanych próbek



Fot. 7. Wyroszenie związków lotnych na próbce A (butyl)



Fot. 8. Wyroszenie związków lotnych na próbce B (tiokol 1)



Fot. 9. Wyroszenie związków lotnych na próbce C (poliuretan 1)



Fot. 10. Wyroszenie związków lotnych na próbce D (tiokol 2)



Fot. 11. Wyroszenie związków lotnych na próbce E (poliuretan 2)

przedstawiono w tabeli 1. Liczby w nawiasie oznaczają mikroobszary, zaznaczone na zdjęciach SEM.

Badania w mikroskopie skaningowym oraz wcześniejsze sprawdzenie charakteru wady pozwalają przypuszczać, że wady na powłoce niskoemisyjnej są spowodowane kondensacją na niej związków lotnych. Obecność węgla oraz śladowych ilości siarki w mikroobszarach ze zmianami może oznaczać, że związki lotne najprawdopodobniej wydzielają się z uszczelnienia zastosowanego w szybie zespolonej. Za emisją związków lotnych przemawia również fakt, iż uszczelnienie może je emitować, jeżeli w trakcie użytkowania jest poddane działaniu wyższych temperatur. Na zdjęciach skaningowych można również zauważyć twory przypominające kształt liścia klonu. Mają one ten sam identyczny skład chemiczny jak pozostała część powierzchni szkła nie objętego wadą. Zgodnie z literaturą można przyjąć, że są to mikroodpryski szkła hartowanego, które powstały na skutek jego rozbicia w trakcie przygotowywania próbki do badania skaningowego [1].

Na urządzeniu do badania wyroszenia związków lotnych, skonstruowanym zgodnie z wytycznymi normy PN-EN 1279-6, sprawdzono masy uszczelniające stosowane w szymbach zespolonych pod kątem emisji związków lotnych. Każda z badanych mas została zamknięta w przestrzeni międzyszybowej specjalnie przygotowanej konstrukcji, składającej się z dwóch tafli szkła hartowanego spiętych z ramką dystansową przy użyciu zacisków (fot. 6). W przestrzeni międzyszybowej, w kopercie znajdowało się sito molekularne, które miało zapobiegać skropleniu pary wodnej. Każdy z badanych obiektów był umieszczony wewnątrz tego rodzaju konstrukcji. W celu określenia ubytku masy, próbki były ważone przed badaniem i po nim. Ponadto jedna z tafli szkła posiadała powłokę niskoemisyjną, którą analizowano po badaniu pod kątem wystąpienia wyroszenia

Tabela 2. Ubytek masy badanych próbek mas uszczelniających

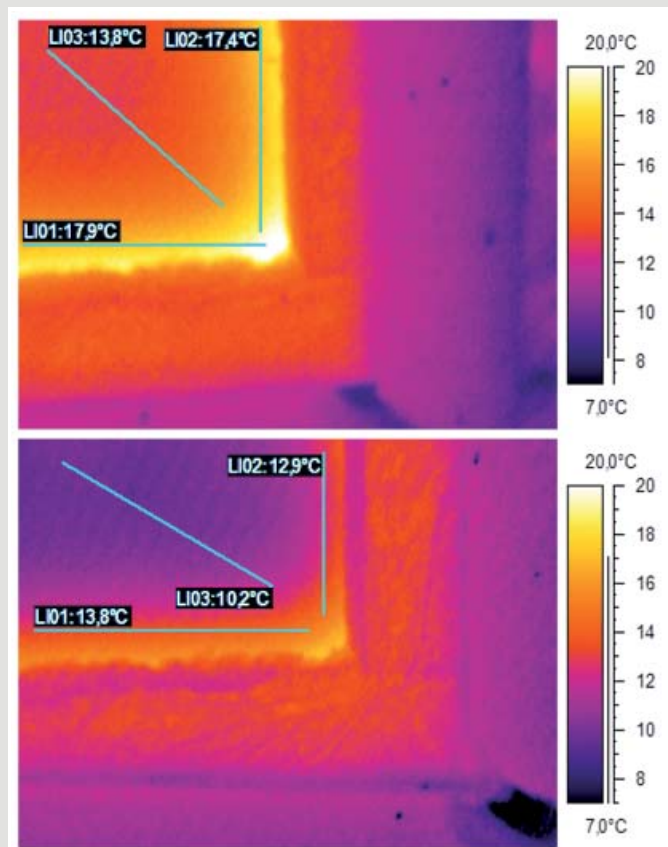
Nr próbki	Rodzaj masy uszczelniającej	Masa przed badaniem [g]	Masa po badaniu [g]	Ubytek masy [%]
A	butyl	9,779	9,756	0,24
B	tiokol 1	11,414	11,308	0,93
C	poliuretan 1	11,307	11,293	0,12
D	tiokol 2	10,373	10,328	0,43
E	poliuretan 2	10,578	10,560	0,17
F	próbka bez masy uszczelniającej	nie dotyczy	nie dotyczy	nie dotyczy

związków lotnych.

W urządzeniu do badania wyroszenia związków lotnych, masy uszczelniające były nagrzewane przy pomocy lampy symulującej promieniowanie słoneczne (Ultravitalux 300W) przez 168 godzin. Do środka tafli szkła z powłoką niskoemisyjną była przyłożona chłodnica chłodzona wodą, dzięki czemu możliwa byłaby kondensacja związków lotnych w przypadku ich emisji.

Rodzaje badanych mas uszczelniających wraz z wynikami badania wyroszenia związków lotnych zestawiono w tabeli 2. oraz na fotografiach od 7. do 11.

We wszystkich badanych obiektach wystąpił ubytek masy w wyniku nagrzewania w temperaturze około 60 °C, co wskazuje na możliwość emisji związków lotnych. Najbardziej widoczne przebarwienia na powłoce niskoemisyjnej, były obserwowane na szymbach, w których przestrzeniach międzyszybowych znajdowało się butyl lub tiokol. Dla tych próbek charakterystyczny był także największy ubytek masy uszczelnień. Obserwowana różnica w wyglądzie odbarwienia pomiędzy próbkami B i D, w których zastosowano różne rodzaje tiokolu (masy dwuskładnikowe), może wynikać ze sposobu przygotowania



Fot. 12. Zdjęcie termowizyjne szyby ze stalową ramką (na górze) oraz szyby z ciepłą ramką (na dole) w 2h cyklu klimatycznego

tego rodzaju masy uszczelniającej przez producenta szyb zespolonych. Inną przyczyną bywa również jakość składników, która może być różna, zależnie od producenta uszczelnienia lub innych warunków. Najmniejszy efekt odbarwienia uzyskano na próbkach C i E, gdzie zastosowano masy uszczelniające na bazie poliuretanu. W przypadku tych próbek stwierdzono również najniższy ubytek masy, który nie przekraczał 0,17% i był ponad 2 razy niższy niż dla próbek, w których użyto tiokolu. Największą tendencję do tworzenia odbarwień na powłoce niskoemisyjnej zauważono na próbce z butylem. W tym przypadku odbarwienie jest bardzo dobrze widoczne już przy ubytku masy na poziomie 0,24%. Na próbce kontrolnej F, w której przestrzeni międzyszybowej nie było próbki masy uszczelniającej, nie odnotowano żadnych zmian na powłoce niskoemisyjnej.

Badania termowizyjne miały na celu symulację zjawiska tworzenia się mostka termicznego przy ramce dystansowej szyby zespolonej. Mostki termiczne mogą zwiększać prawdopodobieństwo wystąpienia odbarwienia na powłoce niskoemisyjnej. Badaniu poddano szybę zespoloną ze stalową ramką dystansową o szerokości 18 mm oraz szybę zespoloną z ciepłą ramką dystansową o takiej samej szerokości. Krawędzie szyb zostały dokładnie uszczelnione materiałem izolacyjnym. Przygotowane w ten sposób próbki poddano cyklicznemu badaniu klimatycznemu, gdzie w pierwszej godzinie cyklu temperatura wynosiła 40°C, po czym w drugiej godzinie cyklu nastąpił stopniowy spadek temperatury do 10°C.

Po upływie tego czasu wykonano zdjęcia termowizyjne dolnych narożników szyby, z zaznaczeniem występujących na nich średnich temperatur (fot. 12).

Przebarwienie na powłoce często pojawia się w pobliżu krawędzi szyby lub szprosów, jeśli są one zamontowane w przestrzeni międzyszybowej. Przyczynę stanowi tworzenie się mostka termicznego, który polega na przewodzeniu ciepła z cieplejszej strony szyby na jej

stronę chłodniejszą. Po słonecznym dniu, w trakcie chłodnej, bezchmurnej nocy, ciepło jest wypromieniowywane przez szybę na zewnątrz, a jego straty są największe w pobliżu ramki dystansowej lub szprosów. W wyniku tego następuje wychładzanie wewnętrznej strony tafli szklanej, co może powodować kondensację obecnych w przestrzeni międzyszybowej związków lotnych. Badania termowizyjne wykazały, iż działanie mostka termicznego było bardziej widoczne w przypadku szyby ze stalową ramką dystansową.

Reasumując, przeprowadzone badania i próby eksperymentalne pozwoliły stwierdzić, że przebarwienie na powłoce niskoemisyjnej nie posiada trwałego charakteru, ponieważ jest usuwalne przez przetarcie miękką tkaniną i można również zaobserwować jego zanik po nagrzewaniu w temperaturze 40°C. Potwierdza to tezę, iż przyczynę przebarwień stanowi kondensacja fazy gazowej (związków lotnych) na szkle. Badania składu chemicznego pierwiastkowego przy użyciu mikroskopu skaningowego, wykazały obecność węgla na próbce z widoczną wadą. Dlatego też można przypuszczać, iż są to związki na bazie węglowodorów. Za emisją związków lotnych przemawia także znany fakt, iż uszczelnienie może je emitować, jeżeli jest poddane w trakcie użytkowania wyższym temperaturom lub działaniu promieni UV. Należy również uwzględnić fakt, iż powłoka niskoemisyjna posiada pewną mikrochropowatość, która jest większa dla powłoki niż dla powierzchni szkła. Obecność srebra w składzie powłoki sprawia, że miejsce w którym nastąpiła kondensacja związków lotnych, staje się wyraźnie widoczne w świetle odbitym, powodując obniżenie walorów estetycznych szkła. Zmiany spowodowane kondensacją byłyby mniej widoczne w przypadku powierzchni szkła bez powłoki.

Związki lotne mogą być obecne w składzie gazu przestrzeni międzyszybowej każdej szyby zespolonej. Jednak prawdopodobieństwo ich kondensacji zależy od konstrukcji i składników szyby zespolonej oraz warunkom, jakim jest poddana w trakcie użytkowania. W szybach zespolonych ze szprosami o dobrej przewodności cieplnej, które znajdują się w niewielkiej odległości od powłoki szkła, podczas spadku temperatury otoczenia (np. zimnej nocy) może nastąpić obniżenie temperatury szkła tuż nad szprosami. Dostępna literatura także potwierdza możliwość występowania gradientu temperatury w tych miejscach, który może skutkować lokalnym przepływem gazu, powodującym dodatkowo obniżenie temperatury szkła (np. na skrzyżowaniu szprosów) [2]. Zjawiska te zwiększają prawdopodobieństwo kondensacji obecnych w przestrzeni międzyszybowej związków lotnych.

### Wnioski

Wyniki przeprowadzonych badań i prób eksperymentalnych oraz analiza informacji w literaturze pozwalają stwierdzić, że zjawisko występowania przebarwienia na powłoce niskoemisyjnej można:

A) ograniczyć przez:

- 1) zastosowanie szerszej ramki dystansowej w komorze ze szprosami, w celu zwiększenia ich odległości od szkła,
- 2) zrezygnowanie z powłoki niskoemisyjnej na pozycji #2 szyby zespolonej, co znacznie zmniejszy widoczność nalotu w razie jego wystąpienia,
- 3) zastosowanie szprosów, których przewodność cieplna jest niższa od przewodności szprosów ze stopu aluminium;

B) wyeliminować przez:

- 1) zastosowanie mas uszczelniających, które mają niską tendencję do emisji związków lotnych.

### LITERATURA

- [1] J. Szelążek, S. Mackiewicz, Z.L. Kowalewski „New samples with artificial voids for ultrasonic investigation of material damage due to creep”.
- [2] A.H. Elmahdy, „Performance Issues with Muntin Bars in Sealed Insulating Glass Units”, artykuł opublikowany przez Instytut Badań w Budownictwie z Kanady.