

## Application of ALD technique to fabricate protective thin films used in optical filters

# Zastosowanie techniki ALD do wytwarzania cienkich warstw ochronnych stosowanych w filtrach optycznych



DOI: 10.15199/62.2025.2.4

The surface of transparent polycarbonate samples was modified by deposition of thin layers of TiO<sub>2</sub> (500–2000 deposition cycles) using the atomic layer deposition (ALD) technique. Surface wettability, wide-angle scattered light (WASL), luminance coeff., and optical radiation-blocking capability were evaluated. The deposited TiO<sub>2</sub> layers significantly reduced surface free energy and increased the contact angle, which may be beneficial for imparting self-cleaning properties to the surface. Spectral anal. demonstrated effective UV-blocking by the TiO<sub>2</sub> coatings, while WASL and luminance coeff. measurements indicated that even with an increased no. of cycles, the coatings met normative requirements for visual quality.

**Keywords:** thin films, atomic layer deposition (ALD), optical protective coatings, optical protective filters

Przedstawiono ocenę możliwości wykorzystania techniki ALD do nanoszenia cienkich warstw TiO<sub>2</sub> o zróżnicowanej grubości na próbkach materiałów przeziernych przeznaczonych do zastosowania w środkach ochrony oczu. Oceniono zwilżalność powierzchni, szerokokątne rozproszenie światła (WASL), współczynnik luminancji oraz zdolność do blokowania promieniowania optycznego. Osadzone powłoki TiO<sub>2</sub> znacząco wpływają na zmniejszenie swobodnej energii powierzchniowej i zwiększenie kąta zwilżania, co może być korzystne w kontekście nadawania powierzchni właściwości samoczyszczących. Analizy spektralne wykazały skuteczne blokowanie promieniowania UV przez powłoki TiO<sub>2</sub>, natomiast pomiary WASL i współczynnika luminancji wskazują, że nawet przy zwiększonej liczbie cykli powłoki spełniają wymagania normatywne dotyczące jakości widzenia.

**Słowa kluczowe:** cienkie warstwy, osadzanie warstw atomowych (ALD), optyczne filtry ochronne, ochrona oczu

Rozwój nowoczesnych technologii optycznych oraz zwiększone wymagania w zakresie ochrony oczu i twarzy w warunkach ekspozycji na szkodliwe promieniowanie optyczne (np. promieniowanie laserowe) sprawiają, że konieczne jest opracowanie innowacyjnych powłok ochronnych<sup>1)</sup>.

Ze względu na ich wyjątkowe właściwości w ostatnich latach szeroko badano powłoki z ditlenku tytanu (TiO<sub>2</sub>). Znajdują one zastosowanie w wielu obszarach, takich jak powierzchnie samoczyszczące<sup>2)</sup>, powłoki antyrefleksyjne<sup>3)</sup> oraz urządzenia optoelektroniczne. Wszechstronność TiO<sub>2</sub>

wynika z jego regulowanej szerokości przerwy energetycznej, wysokiej przezroczystości w zakresie widzialnym oraz zdolności do poprawy właściwości powierzchni<sup>4)</sup>, takich jak superhydrofilowość i aktywność fotokatalityczna. Cechy te są uzależnione od stosowanych metod osadzania, domieszkiwania oraz dostosowania grubości warstw i mikrostruktury<sup>5)</sup>.

Wśród metod osadzania na szczególną uwagę zasługuje technologia osadzania warstw atomowych ALD (*atomic layer deposition*), umożliwiająca precyzyjne, jednorodne i stabilne osadzanie powłok na różnych podłożach<sup>6, 7)</sup>,



Dr Małgorzata OKRASA (ORCID: 0000-0003-4980-0909) jest kierownikiem Pracowni Ochrony Oczu i Twarzy w Zakładzie Środków Ochrony Indywidualnej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego. Jest członkiem komitetu sterującego International Society of Respiratory Protection i członkiem zarządu Polskiego Towarzystwa Towaroznawczego. Specjalność – badania w zakresie metod badania oraz konstrukcji innowacyjnych środków ochrony indywidualnej z wykorzystaniem zaawansowanych narzędzi informatycznych służących do modelowania i analizy procesów fizycznych.



Inż. Małgorzata CICHOWLAS (ORCID: 0009-0008-9340-5600) w roku 2024 ukończyła studia I stopnia na kierunku inżynieria wzornictwa przemysłowego na Politechnice Łódzkiej. Obecnie pracuje jako technik w Pracowni Ochrony Oczu i Twarzy w Zakładzie Środków Ochrony Indywidualnej Centralnego Instytutu Ochrony Pracy – Państwowego Instytutu Badawczego. Specjalność – inżynieria materiałowa.

**\* Adres do korespondencji:**

Zakład Środków Ochrony Indywidualnej, Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Wierzbowa 48, 90-133 Łódź, e-mail: malci@ciop.lodz.pl

w tym na poliwęglanie, tworzywie powszechnie stosowanym w produkcji okularów ochronnych i osłon twarzy. ALD pozwala na kontrolowane osadzanie warstw  $\text{TiO}_2$ , które mogą być modyfikowane w celu uzyskania pożądanych właściwości optycznych i funkcjonalnych, zwiększając tym samym ich przydatność w zaawansowanych powłokach optycznych<sup>8)</sup>.

W kontekście ochrony przed promieniowaniem optycznym i poprawy parametrów wytrzymałościowych zastosowanie powłok  $\text{TiO}_2$  osadzanych metodą ALD może stanowić efektywne rozwiązanie dla okularów ochronnych i filtrów optycznych stosowanych w przemyśle, medycynie oraz sektorze wojskowym.

Celem pracy była ocena możliwości wykorzystania techniki ALD do osadzania cienkich powłok  $\text{TiO}_2$  na powierzchni poliwęglanu oraz analiza ich właściwości, takich jak transmisja, rozproszenie światła i energia powierzchniowa.

## Część doświadczalna

### Materiał badawczy

Jako materiał podłoża zastosowano arkusz wizjera osłony twarzy, wykonany z poliwęglanu Lexan Polycarbonate 9030 (SABIC, Arabia Saudyjska). Materiał ten charakteryzuje się gęstością  $1,2 \text{ g/cm}^3$ , grubością wynoszącą  $0,87 \text{ mm}$  oraz twardością  $80 \text{ ShA}$ . Wybór poliwęglanu podyktowany był jego szerokim zastosowaniem w produkcji przeziernych elementów ochronnych, takich jak okulary ochronne. Arkusz poliwęglanowy otrzymano z wymiennego wizjera osłony twarzy, a następnie pocięto na próbki o wymiarach  $1 \times 1 \text{ cm}$  oraz  $5 \times 5 \text{ cm}$  za pomocą plotera laserowego, zgodnie z wymaganiami technik analitycznych stosowanych w pracy.

### Metodyka badań

#### Depozycja cienkich warstw metodą ALD

Powierzchnia próbek poliwęglanu została zmodyfikowana poprzez depozycję cienkich warstw ditlenku tytanu metodą ALD. Do procesu wykorzystano sys-

tem Thermal Atomic Layer Deposition R-200 Standard firmy Picosun (Finlandia). Depozycję przeprowadzono w temp.  $120^\circ\text{C}$ , po uprzedniej stabilizacji termicznej próbek trwającej  $120 \text{ min}$ . Jako prekursora tytanu użyto tetrachlorku tytanu ( $\text{TiCl}_4$ , 99,9999% Ti, Epivalence Ltd., USA), który w reakcji z wodą umożliwił uzyskanie warstw  $\text{TiO}_2$  na powierzchni modyfikowanego podłoża. Jego wybór został podyktowany prowadzeniem depozycji na podłożu polimerowym, co wymusza prowadzenie reakcji w temperaturach poniżej temperatury trwałych przemian fazowych poliwęglanu<sup>9, 10</sup>, jak również faktem, że w porównaniu z innymi opcjami jest relatywnie tani, co może mieć wpływ na możliwość późniejszego zastosowania w procesach przemysłowych. Proces ALD jest sekwencyjny i obejmował następujące etapy: (i) wprowadzenie pierwszego prekursora ( $\text{TiCl}_4$ ) do komory, (ii) przepłukanie gazem obojętnym ( $\text{N}_2$ , Linde, Polska), (iii) wprowadzenie drugiego prekursora (woda destylowana,  $\text{H}_2\text{O}$ ) oraz (iv) ponowne przepłukanie gazem obojętnym ( $\text{N}_2$ ). Depozycję przeprowadzono w różnych liczbach cykli (500, 1000, 1500 i 2000), aby uzyskać warstwy o zróżnicowanej grubości (rys. 1).

### Analiza powłok $\text{TiO}_2$

Charakterystykę powierzchni przeprowadzono za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego Nova NanoSEM 230 firmy FEI (Holandia), wyposażonego w mikroanalizator rentgenowski EDS Apollo firmy EDAX (Wielka Brytania). Próbkę zamocowano na stoliku za pomocą przewodzącej taśmy węglowej. Obrazy powierzchni uzyskiwano w warunkach niskiej próżni przy energii

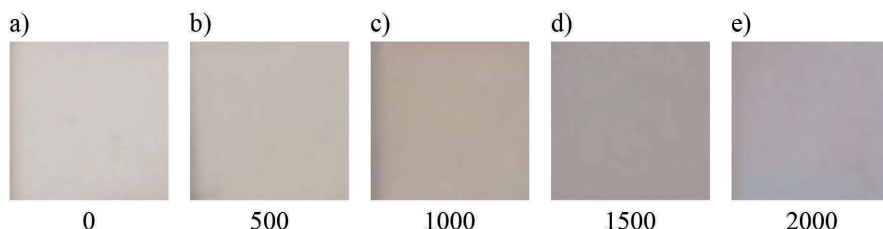


Fig. 1. Images of samples; a) unmodified polycarbonate (PC), b)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{500}$ , c)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{1000}$ , d)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{1500}$ , e)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{2000}$

Rys. 1. Zdjęcia próbek; a) niemodyfikowany poliwęglan (PC), b)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{500}$ , c)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{1000}$ , d)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{1500}$ , e)  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{2000}$



Dr hab. Michał PUCHALSKI (ORCID: 0000-0001-7848-9801) jest zastępcą dyrektora ds. rozwoju w Instytucie Włókiennictwa Politechniki Łódzkiej. Jest prezesem łódzkiego oddziału Polskiego Towarzystwa Towaroznawczego. Od lat zajmuje się tematyką z zakresu fizyki cienkich warstw i nanomateriałów w tym  $\text{TiO}_2$ , nanosrebrem i grafenem. Specjalność – badania nad przetwórstwem i degradacją biopochodnych tworzyw polimerowych.

wiązki elektronów wynoszącej  $10 \text{ keV}$  dla obrazowania SEM oraz  $15 \text{ keV}$  dla mikroanalizy rentgenowskiej. Wyniki obejmowały mikrofotografie, mapy chemiczne oraz ilościową analizę pierwiastkową, wykonaną zgodnie z procedurą korekcyjną ZAF.

Do pomiaru grubości cienkich warstw zastosowano system spektrofotometryczny FR-pRo firmy ThetaMetrisis (Grecja), umożliwiający pomiary w zakresie od  $1 \text{ nm}$  do  $1 \text{ mm}$ . Grubość każdej próbki mierzono w 35 miejscach.

Pomiar kąta zwilżania i swobodnej energii powierzchni wykonano za pomocą zestawu pomiarowego skonstruowanego przez Instytut Włókiennictwa Politechniki Łódzkiej,



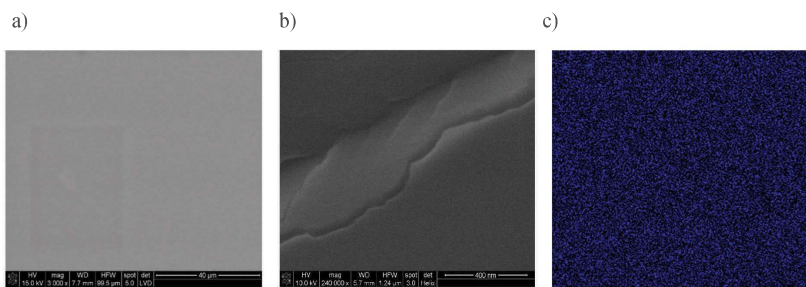


Fig. 2. SEM images of  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{2000}$  samples at a magnification of a)  $\times 3000$  and b)  $\times 240,000$ , c) EDS analysis

Rys. 2. Obrazy SEM próbek  $\text{TiO}_2@\text{PC}_{2000}$  przy powiększeniu a)  $\times 3000$  oraz b)  $\times 240\,000$ , c) analiza EDS

wyposażonego w źródło światła, precyzyjny stolik i mikroskop z kamerą CCD. Krople o objętości  $1\ \mu\text{L}$  nanoszono na próbki o wymiarach  $1 \times 1\ \text{cm}$  za pomocą mikrostrzykawki. Kąty zwilżania mierzono 3-krotnie, stosując wodę destylowaną (ciecz polarna) i diiodometan (ciecz dyspersyjna). Na podstawie wyników obliczono składowe dyspersyjne, polarne oraz całkowitą swobodną energię powierzchniową.

Jakość materiału optycznego i jego powierzchni oceniono poprzez pomiar szerokokątnego rozproszenia światła, zgodnie z normą<sup>11)</sup>, za pomocą spektrofotometru z kulą całkowitą Ulbrichta, w zakresie długości fal  $280\text{--}780\ \text{nm}$ .

Współczynnik przepuszczania światła zmierzono zgodnie z normą<sup>9)</sup>, za pomocą spektrofotometru Cary 5E (Varian, USA) z kulą całkowitą Ulbrichta do pomiaru odbicia i rozproszenia. Badanie obejmowało zakres długości fal  $200\text{--}2650\ \text{nm}$ , przy próbkowaniu co  $1\ \text{nm}$ . Przed badaniem wyznaczono linię bazową dla 100% i 0% transmisji, a pomiary przeprowadzono w centralnej części próbek o wymiarach  $5 \times 5\ \text{cm}$ , w warunkach wilgotności 30% i temp.  $23^\circ\text{C}$ .

## Wyniki badań

Wyniki badań SEM-EDS (rys. 2) potwierdziły skuteczność metody ALD w osadzaniu warstw  $\text{TiO}_2$  na powierzchni poliwęglanu, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami

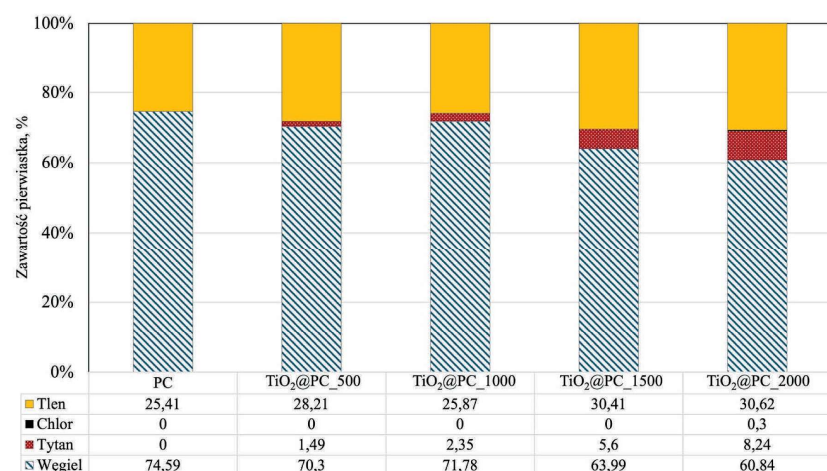


Fig. 3. Elemental composition as a function of the number of titanium dioxide deposition cycles on the polycarbonate surface

Rys. 3. Zawartość procentowa pierwiastków w zależności od liczby cykli nanoszenia tlenku tytanu na powierzchnię poliwęglanu

nad powłokami z  $\text{TiO}_2$  otrzymywanymi metodą ALD, które wskazują na możliwość kontrolowanego wzrostu warstwy i tworzenia struktur amorficznych<sup>10, 12)</sup>. W badaniu powierzchni niemodyfikowanego poliwęglanu zaobserwowano niewielkie defekty, które jednak nie miały istotnego wpływu na depozycje  $\text{TiO}_2$  techniką ALD<sup>13, 14)</sup>.

Początkowe obrazy SEM po 500 cyklach ujawniły formowanie się kulistych nanostruktur, co jest charakterystyczne dla warstw amorficznych. Wraz ze wzrostem liczby cykli struktura  $\text{TiO}_2$  przechodziła w bardziej ciągłą warstwę (rys. 2a), co jest potwierdzeniem skutecznego, powtarzalnego osadzania, które pozwala na tworzenie jednorodnych powłok przy stosunkowo niskich temperaturach procesu ALD. Jedynie w przypadku 2000 cykli depozycji odnotowano lokalne pęknięcia i defekty widoczne dopiero przy powiększeniach rzędu 200 000 razy (rys. 2b).

Mikroanaliza EDS wykazała rosnącą zawartość tytanu wraz ze wzrostem liczby cykli (zależność liniowa). Obserwowano także obecność śladowych ilości chloru przy dużej liczbie cykli, mogącą wynikać z niepełnego przereagowania  $\text{TiCl}_3$  (rys. 3). Podobne efekty można ograniczyć poprzez podwyższenie temperatury lub zmianę prekursora<sup>15)</sup>. Mapy chemiczne (rys. 2c) wykazały równomierność rozłożenia  $\text{TiO}_2$ , co dowodzi skuteczności metody ALD w kontrolowanym rozkładzie powłok na nieregularnych powierzchniach. Wzrost zagęszczenia tytanu wraz z liczbą cykli i wynikowa jednorodność powłoki są istotne dla aplikacji wymagających precyzyjnej kontroli grubości i jednorodności warstwy, takich jak optyka.

Średnie wartości grubości powłok wzrastały proporcjonalnie do liczby cykli, co odpowiadało oczekiwanym efektem procesu ALD, gdzie przyrost grubości jest zwykle proporcjonalny do liczby cykli. Analiza wyników (rys. 4) wskazuje na istotny wzrost odchylenia standardowego oraz rozrzut wartości maksymalnych i minimalnych przy większych liczbach cykli (1500 i 2000 cykli), co sugeruje nierównomierność depozycji. Duże odchylenie standardowe mogło wynikać z niejednorodności osadzonej warstwy oraz występowania lokalnych nieciągłości powłoki, związanych z temperaturą i charakterystyką wzrostu wyspowego na początkowym etapie procesu osadzania, a także z przejścia do ciągłej warstwy przy większej liczbie cykli.

Obserwacje zmian grubości warstwy pomiędzy 500 a 1000 cyklami pokazały prawie 2-krotne zwiększenie grubości, co było spójne z wynikami SEM-EDS, gdzie również odnotowano 2-krotny wzrost zawartości tytanu w tej samej liczbie cykli. Taki zbieżny wzrost grubości i masy potwierdza efektyw-

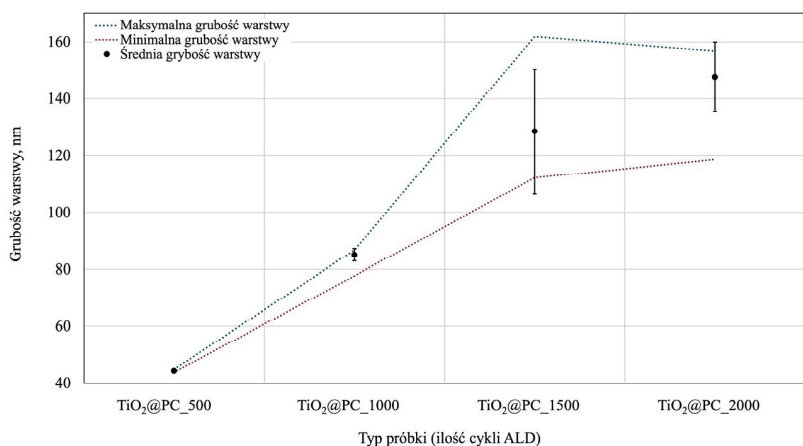


Fig. 4. Average thickness of the  $TiO_2$  layer on polycarbonate surface as a function of ALD deposition cycles

Rys. 4. Średnia grubość warstwy  $TiO_2$  na powierzchni poliwęglanu w zależności od liczby cykli depozycji ALD

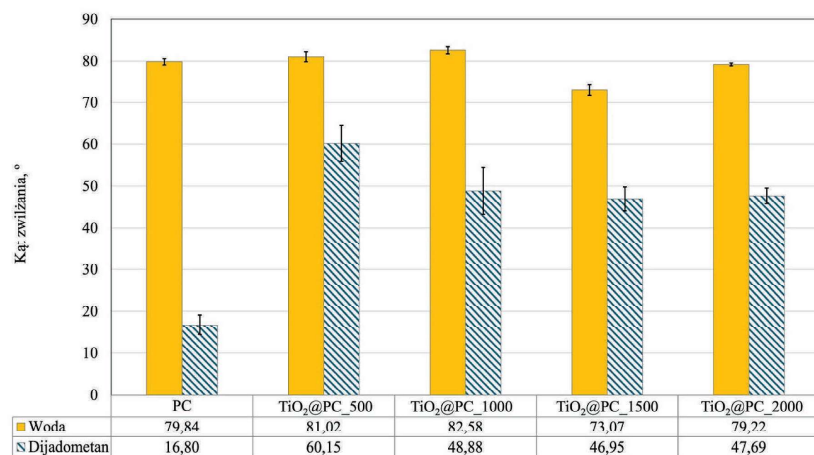


Fig. 5. Average contact angles for water and diiodomethane on various  $TiO_2$ -coated polycarbonate surfaces

Rys. 5. Średnie wartości kąta zwilżania dla wody i diiodometanu dla różnych wariantów powłok  $TiO_2$  na powierzchni poliwęglanu

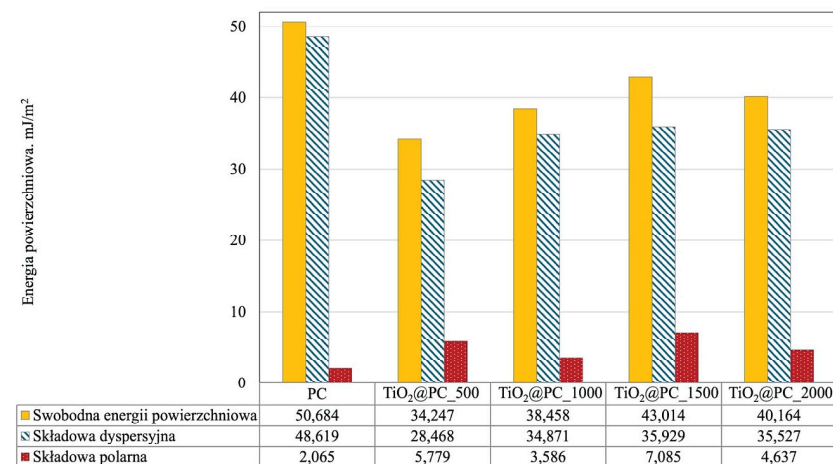


Fig. 6. Surface free energy and its components (dispersive and polar) for various  $TiO_2$ -coated polycarbonate samples

Rys. 6. Swobodna energia powierzchniowa dla różnych wariantów powłok  $TiO_2$  na powierzchni poliwęglanu

ność metody ALD. Pomiedzy 1000 a 1500 oraz 1500 a 2000 cyklami obserwowano mniejsze przyrosty grubości powłok, co może sugerować występowanie dodatkowych zjawisk, takich jak ograniczenia w dostępie prekursora.

Na podstawie wyników pomiarów kątów zwilżania dla wody i diiodometanu (rys. 5) obserwowano wyraźne różnice w zwilżalności powierzchni poliwęglanu (PC) w porównaniu z próbkami pokrytymi powłoką  $TiO_2$ . Warianty powłok  $TiO_2$ , uzyskane przy różnych liczbach cykli depozycji (500–2000), wpływały na stopniowy spadek swobodnej energii powierzchniowej, co wynikało z modyfikacji struktury powierzchni, jej składu chemicznego oraz topografii. Największy kąt zwilżania dla wody odnotowano dla próbek  $TiO_2@PC_{1000}$ , natomiast wartość ta malała przy większej liczbie cykli, co mogło być skutkiem tworzenia się niejednorodności powierzchni, wykazanych w badaniach SEM.

Wyniki dla diiodometanu wskazały, że kąt zwilżania był istotnie większy dla próbek z powłoką  $TiO_2$  niż dla niemodyfikowanego poliwęglanu, szczególnie przy mniejszej liczbie cykli (500 i 1000). Mogło to być wynikiem obecności większych, sferycznych obiektów na powierzchni  $TiO_2$ , które tworzyły się we wczesnych etapach procesu ALD. Struktury te mogły wpływać na zwilżalność poprzez zwiększenie komponentu dyspersyjnej swobodnej energii powierzchniowej.

Niemodyfikowany poliwęglan (PC) wykazywał największą wartość energii powierzchniowej (rys. 6), co potwierdza jego większą zwilżalność zarówno dla wody, jak i diiodometanu. Wartość swobodnej energii powierzchniowej była najmniejsza dla próbki  $TiO_2@PC_{500}$ , co wskazuje na obniżoną zwilżalność wynikającą z pokrycia powierzchni powłoką  $TiO_2$ . Z kolei wzrost energii powierzchniowej przy 1500 cyklach mógł być związany z bardziej jednolitą warstwą  $TiO_2$ , uzyskaną przy większej liczbie cykli, co prowadziło do wygładzenia powierzchni. Wyższa swobodna energia powierzchniowa tej próbki mogła wskazywać na bardziej polarną naturę osadzonej warstwy, wynikającą z pełniejszego pokrycia powierzchni poliwęglanu  $TiO_2$ .

Analiza stopnia szerokokątnego rozproszenia światła (WASL) dla badanych próbek (rys. 7) pokazała, że wartość tego parametru rosła wraz ze zwiększeniem liczby cykli depozycji  $TiO_2$  na powierzchni poliwęglanu. Niemodyfikowany poliwęglan (PC) cechował się najniższym



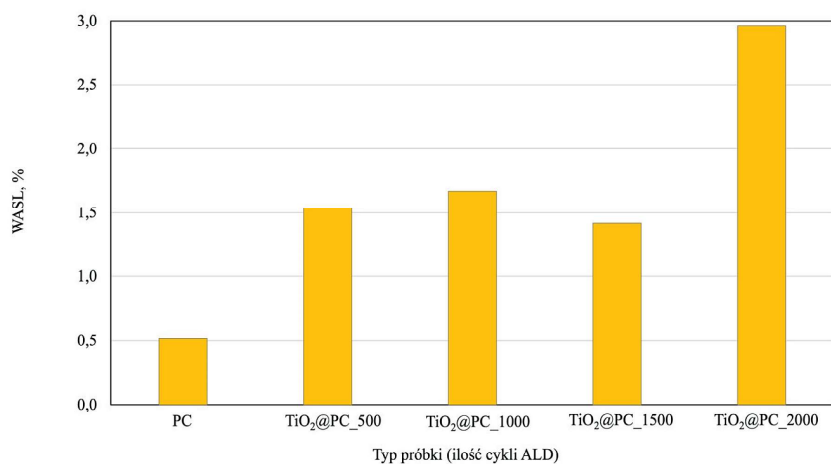


Fig. 7. Wide angle light scattering for various TiO<sub>2</sub>-coated polycarbonate samples

Rys. 7. Szerokokątne rozproszenie światła dla różnych wariantów powłok TiO<sub>2</sub> na powierzchni poliwęglanu

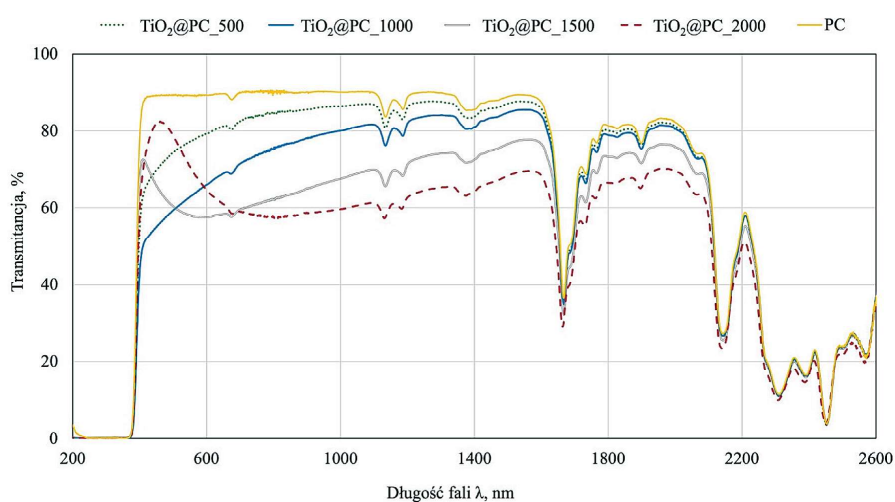


Fig. 8. Comparison of averaged transmittance spectra in the UV, visible, and infrared ranges for various TiO<sub>2</sub>-coated polycarbonate samples

Rys. 8. Porównanie uśrednionych widm transmitancji w zakresie UV, światła widzialnego i podczerwieni dla różnych wariantów powłok TiO<sub>2</sub> na powierzchni poliwęglanu

WASL wynoszącym 0,52%, podczas gdy powłoka TiO<sub>2</sub> przy 2000 cyklach osiągała wartość 2,96%. Choć wartości WASL przy cyklach 500, 1000 i 1500 były zbliżone (odpowiednio 1,54%, 1,67% i 1,42%), to wariant 1500 cykli wykazywał minimalne WASL spośród wszystkich próbek poddanych modyfikacji, co mogło wynikać z większej jednorodności warstwy w tym przedziale liczby cykli. Wszystkie wartości WASL pozostały poniżej 3%, spełniając normatywne wymagania<sup>16)</sup>, które stanowią, że powłoka nie powinna znacząco wpływać na jakość widzenia. Te wyniki sugerują, że chociaż powłoka TiO<sub>2</sub> zwiększała szerokokątne rozproszenie światła, to zmiany te były akceptowalne z punktu widzenia aplikacji w środkach ochrony oczu.

Na rys. 8 przedstawiono charakterystyki spektralne dla niemodyfikowanego poliwęglanu oraz próbek z naniesionymi powłokami TiO<sub>2</sub> przy różnych liczbach cykli depozycji. Wyniki pokazują, że przy mniejszej liczbie cykli (500) warstwa TiO<sub>2</sub> obniżała transmitancję światła widzialnego,

co było widoczne w spadku wartości transmitancji w porównaniu z próbką referencyjną. Dalsze zwiększenie liczby cykli prowadziło do jeszcze mniejszej przepuszczalności światła, co wynikało ze zwiększonej grubości warstwy TiO<sub>2</sub>, jak wykazano również w analizach SEM.

Wszystkie próbki skutecznie blokowały promieniowanie UV do ok. 400 nm, co jest kluczowe dla ochrony przed szkodliwym wpływem promieniowania ultrafioletowego. Sam poliwęglan (PC) ma naturalną zdolność do pochłaniania promieniowania z zakresu nadfioletu (UV) w zakresie ok. 300–400 nm, dzięki czemu już sam w sobie zapewnia pewną ochronę przed UV. Jednakże ta właściwość ma ograniczenia, z czasem może ulec degradacji pod wpływem ekspozycji na UV, co powoduje jego żółknięcie i osłabienie mechaniczne<sup>17)</sup>.

W zakresie światła widzialnego (380–780 nm) transmitancja dla wszystkich wariantów z powłoką TiO<sub>2</sub> była niższa niż dla niemodyfikowanego poliwęglanu, ale nadal pozostawała na relatywnie wysokim poziomie, co może być korzystne dla zastosowań optycznych wymagających jednocześnie dobrej ochrony i widoczności. W zakresie podczerwieni (780–2650 nm) transmitancja stopniowo malała wraz ze wzrostem liczby cykli, co wskazuje na rosnące właściwości absorpcyjne powłoki w tym zakresie. Może to być korzystne w kontekście zmniejszania przepuszczania określonych długości promieniowania

i aplikacji filtrów w środkach ochrony oczu, np. przed promieniowaniem laserowym<sup>18)</sup>.

## Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdzają, że technika ALD umożliwia skuteczne i kontrolowane osadzanie cienkich, ochronnych warstw TiO<sub>2</sub> na powierzchni poliwęglanu, co czyni ją odpowiednią technologią do wytwarzania filtrów optycznych. Proces ALD zapewnia precyzyjną kontrolę grubości i jednorodności powłoki, co zostało potwierdzone poprzez liniowy przyrost grubości i zawartości tytanu w zależności od liczby cykli depozycji.

Analiza kątów zwilżania wykazała, że modyfikacja powierzchni poliwęglanu warstwą TiO<sub>2</sub> wpływa na zwilżalność, zmniejszając wartości swobodnej energii powierzchniowej, szczególnie dla powłok o mniejszej liczbie cykli. Taka możliwość regulacji zwilżalności powierzchni może

być wykorzystana do nadawania dodatkowych funkcji, takich jak właściwości samoczyszczące. Badania wykazały również, że chociaż powłoka TiO<sub>2</sub> zwiększa szerokokątne rozproszenie światła (WASL), wartości tego parametru pozostają zgodne z normami, co wskazuje na brak negatywnego wpływu na jakość widzenia.

Zastosowanie powłok TiO<sub>2</sub> osadzanych metodą ALD w okularach ochronnych może przyczynić się do poprawy ich funkcjonalności, ochrony przed UV oraz wytrzymałości mechanicznej, spełniając jednocześnie wymagania normatywne w zakresie optycznych parametrów jakościowych.

Zrealizowano na podstawie wyników VI etapu programu wieloletniego pn. „Rządowy Program Poprawy Bezpieczeństwa i Warunków Pracy”, finansowanego w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, projekt nr I.PN.06 pt. „Optyczne filtry ochronne do zastosowań w warunkach narażenia na promieniowanie laserowe w przemyśle, medycynie oraz sektorze wojskowym”. Koordynator Programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

Otrzymano: 28-10-2024

Zrecenzowano: 08-11-2024

Zaakceptowano: 03-02-2025

Opublikowano: 20-02-2025

#### LITERATURA

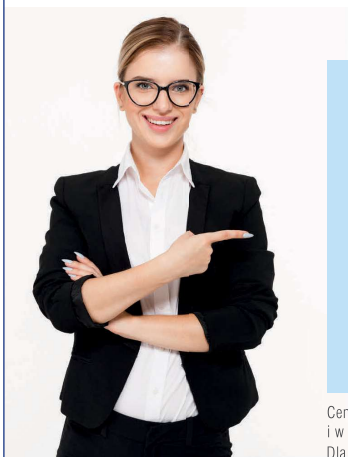
- [1] B.A.J. Clark, *Clin. Exp. Optom.* 1972, **55**, nr 11, 470, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1111/j.1444-0938.1972.tb06435.x>.
- [2] C. Euvananont, C. Junin, K. Inpor, P. Limthongkul, C. Thanachayanont,

*Ceram. Int.* 2008, **34**, nr 4, 1067, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0272884207003112>.

- [3] B.S. Richards, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells* 2003, **79**, nr 3,369, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0927024802004737>.
- [4] R. Mechiakh, N. Ben Sedrine, R. Chtourou, R. Bensahan, *Appl. Surf. Sci.* 2010, **257**, nr 3, 670, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169433210010676>.
- [5] L.S. Gao, Q.Y. Cai, E.T. Hu, Q.Y. Zhang, Y.T. Yang, Y.B. Xiong i in., *Opt. Express* 2023, **31**, nr 8, 13503, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=oe-31-8-13503>.
- [6] L. Hu, W. Qi, Y. Li, *Nanotechnol. Rev.* 2017, **27**, nr 6, 527, <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/ntrev-2017-0149/html>.
- [7] P.O. Oviroh, R. Akbarzadeh, D. Pan, R.A.M. Coetzee, T.C. Jen, *Sci. Technol. Adv. Mater.* 2019, **20**, nr 1, 465, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14686996.2019.1599694>.
- [8] T. Alasaarela, L. Karvonen, H. Jussila, A. Säynätjoki, S. Mehravar, R.A. Norwood i in., *Opt. Lett.* 2013, **38**, nr 20, 3980, <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=ol-38-20-3980>.
- [9] D. Hiller, F. Munnik, J. López-Vidrier, D. Solonenko, J. Reif, M. Knaut i in., *J. Vac. Sci. Technol. A* 2024, **42**, nr 3, 032406, <https://pubs.aip.org/jva/article/42/3/032406/3279959/Comparison-of-three-titanium-precursors-for-atomic>.
- [10] K. Turlakiewicz, S. Sztajnowski, W. Sujka, I. Krucińska, G. Szparaga, M. Puchalski, *Polym. Test.* 2023, **124**, 108065, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0142941823001459>.
- [11] PN-EN ISO 18526-1:2020-09, *Ochrona oczu i twarzy. Metody badań. Cz. 1. Geometryczne właściwości optyczne*.
- [12] J.P. Niemelä, G. Marin, M. Karppinen, *Semicond. Sci. Technol.* 2017, **32**, nr 9, 093005, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6641/aa78ce>.
- [13] M. Trought, I. Wentworth, C. de Alwis, T.R. Leftwich, K.A. Perrine, *Surf. Sci.* 2019, **690**, 121479, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0039602819302407>.
- [14] S.M. George, *Chem. Rev.* 2010, **110**, nr 1, 111, <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/cr900056b>.
- [15] R.W. Johnson, A. Hultqvist, S.F. Bent, *Mater. Today* 2014, **17**, nr 5, 236, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1369702114001436>.
- [16] PN-EN ISO 16321-1:2022-10, *Ochrona oczu i twarzy do zastosowań zawodowych. Cz. 1. Wymagania ogólne*.
- [17] A.L. Andradý, N.D. Searle, L.F.E. Creadson, *Polym. Degrad. Stab.* 1992, **35**, nr 3, 235, <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/014139109290031Y>.
- [18] M. Okrasa, J. Szkudlarek, G. Owczarek, *Ochrona przed promieniowaniem laserowym*, CIOP-PIB, Warszawa 2025.

## WARIANTY PRENUMERATY CZASOPISMA PRZEMYSŁ CHEMICZNY W 2025 R. (cena jednostkowa 85,00 zł brutto)

- **PRENUMERATA papierowa** – 960,00 zł brutto (w tym wysyłka 42 zł brutto), czasopismo tylko w wersji papierowej
- **PRENUMERATA cyfrowa** – 762,00 zł brutto czasopismo wyłącznie w wersji cyfrowej na Portalu Informacji Technicznej [www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl), prenumerator otrzyma na e-mail link aktywacyjny do zaprenumerowanego numeru
- **PAKIET PLUS** – 1002,00 zł brutto, roczna prenumerata w wersji papierowej i cyfrowej w promocyjnej cenie oraz bezpłatny dostęp do archiwum zaprenumerowanego tytułu na Portalu Informacji Technicznej [www.sigma-not.pl](http://www.sigma-not.pl), prenumerator otrzyma na e-mail link aktywacyjny do zaprenumerowanego numeru



### PRENUMERATĘ MOŻNA ZAMÓWIĆ:

- telefonicznie: 22 840 30 86, 840 35 89,
- e-mailem: [prenumerata@sigma-not.pl](mailto:prenumerata@sigma-not.pl),
- listownie: Zakład Poligrafii i Kolportażu  
Wydawnictwa SIGMA-NOT Sp. z o.o.,  
ul. Ks. J. Popieluszki 19/21, 01-595 Warszawa,
- dokonując wpłaty na konto:  
Wydawnictwo SIGMA-NOT Sp. z o.o.  
ul. Ratuszowa 11, 03-450 Warszawa,  
nr 24 1020 1026 0000 1002 0250 0577

Cena brutto zawiera 8% VAT na czasopisma w wersji papierowej oraz cyfrowej. W przypadku zmiany przez ustawodawcę stawki VAT na czasopisma i w konsekwencji zmiany cen brutto, prenumerator zobowiązany jest do dopłaty różnicy.  
Dla prenumeratorów zagranicznych obowiązuje cena według kursu waluty NBP (z dnia bezpośrednio poprzedzającego datę wystawienia faktury) plus koszty wysyłki.

*W pakiecie taniej*

WYDAWNICTWO SIGMA-NOT