Oryginalny artykuł naukowy (Original research paper)

mgr inż. Adrian Strąk[1)*)]
ORCID:0000-0002-1815-7140
dr inż. Barbara Francke[1)]
ORCID:0000-0001-9525-5468

Wpływ cyklicznych obciążeń mechanicznych na odporność korozyjną aluminium

The effect of mechanical load fatigue on corrosion resistance of aluminium

DOI: 10.15199/33.2021.06.01

Streszczenie. W artykule zaprezentowano wpływ zmęczeniowych obciążeń mechanicznych na odporność korozyjną profili okiennych i drzwiowych wykonanych ze stopu aluminium EN AW-6063 z powłoką poliestrową. W badaniach zastosowano własną metodę oceny, polegającą na cyklicznych obciążeniach skupionych działających na próbkę metodą trójpunktowego zginania. Efektem tych obciążeń było powstanie w obrębie struktury aluminium trwałego odkształcenia plastycznego, podczas gdy w przypadku powłoki pokrywającej profile aluminiowe nastąpiło niewielkie zmniejszenie odporności korozyjnej, niepowodujące jednak utraty właściwości barierowych. Stwierdzono również, że gdy obciążeniom mechanicznym towarzyszy działanie kwaśnej mgły solnej, pojawiają się mikrouszkodzenia w strukturze powłok, w istotny sposób zmniejszając ich właściwości barierowe, co potwierdzono wynikami badań spektroskopii impedancyjnej.
Słowa kluczowe: odporność korozyjna; stop aluminium EN AW-6063; powłoka lakierowa poliestrowa.

Abstract. The article presents the effect of mechanical load fatigue on corrosion resistance of profiles made of EN AW-6063 aluminium alloy with polyester coating. In test, own research methodology was used, consisting in cyclical application of concentrated load to the tested sample with the three-point bending method. The effect of these loads was the formation of a permanent plastic deformation within the aluminium structure, while in the case of the coating covering aluminium profiles, there is a slight reduction in corrosion resistance, without the loss of barrier properties, however. It was also found that when in addition to mechanical load, salt spray test was applied, microdamage in the coatings' structure appeared, significantly reducing their barrier properties, which was confirmed by the results of impedance spectroscopy.

Keywords: corrosion resistance, EN AW-6063 aluminium alloy, polyester paint coating.

Obecnie aluminium jest drugim po żelazie najczęściej stosowanym metalem [3 – 5]. Każdy stop aluminium charakteryzuje się unikatowymi właściwościami. Stop EN AW-6063 [5] jest jednym z częściej wykorzystywanych do wyrobu profili wytłaczanych, odpornych na korozję, o atrakcyjnym wyglądzie powierzchni, łatwo poddających się anodowaniu dekoracyjnemu. Z tego powodu znajduje zastosowanie do produkcji profili okiennych i drzwiowych, sufitów podwieszanych itp.

W celu zwiększenia odporności korozyjnej profili aluminiowych ich powierzchnię zabezpiecza się odpowiednimi powłokami, a do obróbki chemicznej stosowane są m.in. związki chromu sześciowartościowego. Prowadzone są też badania nad zastąpieniem związków chromu innymi powłokami konwersyjnymi np. na bazie związków molibdenu, wolframu, metali ziem rzadkich, czy cyrkonu [1]. Korzystne efekty ze względu na odporność na korozję wykazują powłoki konwersyjne bazujące na związkach tytanu [16]. W pracy [15] przedstawiono wyniki badania odporności korozyjnej powłok konwersyjnych otrzymanych ze związków Ti(III) na podłożu cynkowym. Wskazują, że właściwości elektrochemiczne takich powłok są zbliżone do chromianowych. Mają jednak gorszą odporność na działanie mgły solnej. Dalszy rozwój powłok konwersyjnych zawierających związki Ti wymaga optymalizacji składu kąpieli oraz warunków prowadzenia obróbki.

Podczas eksploatacji profile aluminiowe narażone są na różne oddziaływania chemiczne i mechaniczne. Część z nich, wpływających na odporność korozyjną elementów aluminiowych, jest przedmiotem badań ujętych w normach europejskich. Dotyczy to przede wszystkim oceny na działanie kwaśnej mgły solnej, wilgotnej atmosfery zawierającej SO_2 i wilgoci kondensacyjnej. W przypadku oceny odporności korozyjnej nie uwzględnia się jednak oddziaływania mechanicznego, takiego jak działanie wiatru, drgania, typowe obciążenia eksploatacyjne, które mają wpływ na trwałość elementu budowlanego podobnie jak oddziaływanie typu chemicznego. Biorąc to pod uwagę, przeprowadziliśmy **badania mające na celu ustalenie wpływu skumulowanego działania wymienionych czynników na odporność korozyjną stopu EN AW-6063**. W artykule, oprócz wyników badań, prezentujemy nową, własną metodę oceny wpływu wybranych mechanicznych obciążeń użytkowych na odporność korozyjną aluminium oraz określamy wpływ cyklicznych obciążeń mechanicznych na odporność korozyjną stopu EN AW-6063, pokrytego poliestrową powłoką lakierową. Podstawowym założeniem nowej metody badań jest ocena odporności korozyjnej aluminium w funkcji powtarzalnych obciążeń

[1)] Instytut Techniki Budowlanej; Zakład Inżynierii Materiałów Budowlanych
[*)] Adres do korespondencji: a.strak@itb.pl

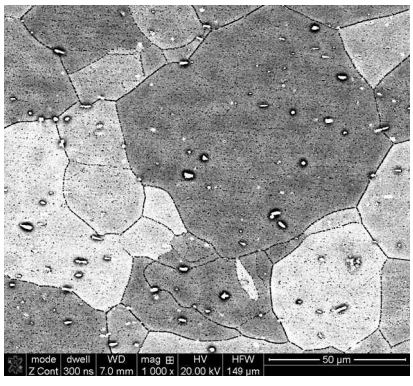
skupionych działających na próbkę metodą trójpunktowego zginania. Miarą odporności korozyjnej jest zdolność do przeniesienia narażeń chemicznych przez próbki poddane wcześniej cyklicznym obciążeniom mechanicznym w porównaniu z próbkami nienarażonymi na takie obciążenia.

Materiał i metody badań

Przedmiotem badań były profile aluminiowe wykonane ze stopu EN AW-6063. Orientacyjny skład chemiczny stopu aluminiowego, określony metodą EDS (*Energy Dispersive X-ray Spectroscopy*), przedstawiono w tabeli 1. Profile aluminiowe wykonano metodą wyciskania hydrostatycznego na gorąco. Strukturę otrzymanego stopu EN AW-6063, określoną metodą SEM (*Scanning Elektron Microscope*), pokazano na fotografii 1. Przed naniesieniem powłoki lakierowej przeprowadzono obróbkę powierzchniową aluminium. Powłokę poliestrową naniesiono metodą lakierowania proszkowego i utwardzono w piecu w temperaturze 180°C przez 18 – 20 min. Mikrostrukturę i przybliżony skład chemiczny powłoki określono metodą SEM i EDS.

Tabela 1. Skład chemiczny stopu EN AW-6063 (Al Mg0, 7Si) określony metodą EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)
Table 1. Chemical composition of the EN AW-6063 (Al Mg0, 7Si) alloy as determined by the EDS (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) method

Zawartość	O	Mg	Al	Si	Fe
Wagowa [%]	0,61	0,83	97,55	0,73	0,29
Atomowa [%]	1,03	0,91	97,23	0,70	0,14



Fot. 1. Mikrostruktura stopu EN AW-6063 określona za pomocą SEM – powiększenie 1000x
Photo 1. Microstructure of the EN AW-6063 alloy, determined by the SEM method – magnification 1000x

W tabeli 2 zaprezentowano wybrane właściwości powłoki: grubość określono wg PN-EN ISO 2360 [6], przyczepność – wg EN ISO 2409 [7], a twardość – wg EN ISO 2815 [8].

Tabela 2. Wybrane cechy fizykomechaniczne powłoki
Table 2. Selected physicomechanical properties of the coating

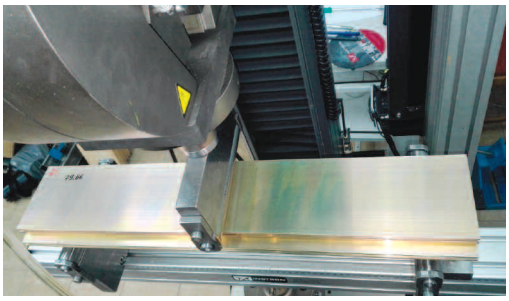
Nr próbki	Grubość [µm]	Przyczepność*)	Twardość wg Buchholtza	
			długość wgłębienia l [mm]	odporność na wciskanie σ_B =100/l
1	65	0	1,1	91
2	78	0	1,1	91
3	83	0	1,0	100
4	80	0	1,0	100
5	85	0	1,1	91
6	76	0	1,1	91
7	78	0	0,9	111
8	74	0	1,1	91
9	83	0	0,9	111
10	68	0	1,1	91
11	86	0	1,0	100
12	75	0	1,1	91
13	79	0	0,9	111
14	74	0	1,0	100
15	76	0	1,1	91

*) Przyczepność metodą siatki nacięć wg EN ISO 2409 ocenia się w skali od 0 do 5 przez porównanie do wzorca rysunkowego, gdzie stopień 5 oznacza brak przyczepności, stopień 0 bardzo dobrą przyczepność do podłoża.

Odporność na obciążenie mechaniczne profili badano własną metodą, wykorzystując maszynę wytrzymałościową. Przyjęto następujące założenia:

- próbki badawcze obciążane były w sposób cykliczny metodą trójpunktowego zginania (fotografia 2), tzn. siłą odpowiadającą wartości strzałki ugięcia l/150, przyłożoną w osi próbki podpartej w dwóch podporach, o rozpiętości 0,6 m. Przy ustalaniu wartości strzałki ugięcia wzorowano się na wymaganiach podanych w normie EN 12210 [9] do oceny wartości ugięcia czołowego najbardziej odkształconego elementu okien i drzwi klasy A;
- obciążenia zadawane były cyklicznie z częstotliwością 0,5 Hz (1 na 2 s).

W przypadku każdej z próbek wykonano 2000 cykli obciążeniowych. Liczbę cykli zmęczeniowych ustalono na podstawie doświadczeń badawczych dotyczących elementów okien i drzwi. Badaniom poddano 15 wybranych fragmentów profili i określono wartość ugięcia trwałego kształtowników po działaniu obciążeń zmęczeniowych, a następnie oceniono ich odporność korozyjną (w porównaniu z profilami niepoddanymi obciążeniom mechanicznym), w przypadku:



Fot. 2. Badanie odporności na obciążenia mechaniczne metodą trójpunktowego zginania. Próbka, ułożona swobodnie na dwóch podporach, obciążana jest siłą pionową przyłożoną w połowie jej długości
Photo 2. Test of resistance to mechanical loads using the three-point bending method. The sample, placed freely on two supports, is loaded with a vertical force applied in the middle of the sample length

- działania kwaśnej mgły solnej, wg EN ISO 9227 [10] – test AASS, w czasie: 240, 500, 1000 i 1500 h, na dziesięciu próbkach o wymiarach 100 x 150 mm. Przed badaniem wykonano nacięcia powłoki w kształcie litery X;
- działania wilgoci kondensacyjnej, wg EN ISO 6270-1 [11], test wykonano na pięciu próbkach o wymiarach 100 x 150 mm w czasie 240, 500, 1000 i 1500 h;
- działania wilgotnej atmosfery z SO_2, wg EN ISO 3231 [12], po 5, 10, 15, 20 i 25 cyklach, test wykonano na próbkach 100 x 100 mm;
- występowania korozji nitkowej wg EN ISO 4623-2 [13], ocenionej wg EN ISO 4628-10 [14], po 1000 h. Na próbkach wykonano nacięcie nożem szerokości ostrza 1 mm prostopadle do powierzchni i poddano je działaniu 38% kwasu solnego, a następnie umieszczono w komorze wilgotnościowej w ustabilizowanych warunkach, tzn. o wilgotności RH = 82% i temperaturze T = 40°C.

Wyniki oceniono trzema metodami:

- **wizualnie** – oglądając próbki okiem nieuzbrojonym w świetle dziennym z odległości ok. 1 m i oceniając powstanie ewentualnych pęknięć;

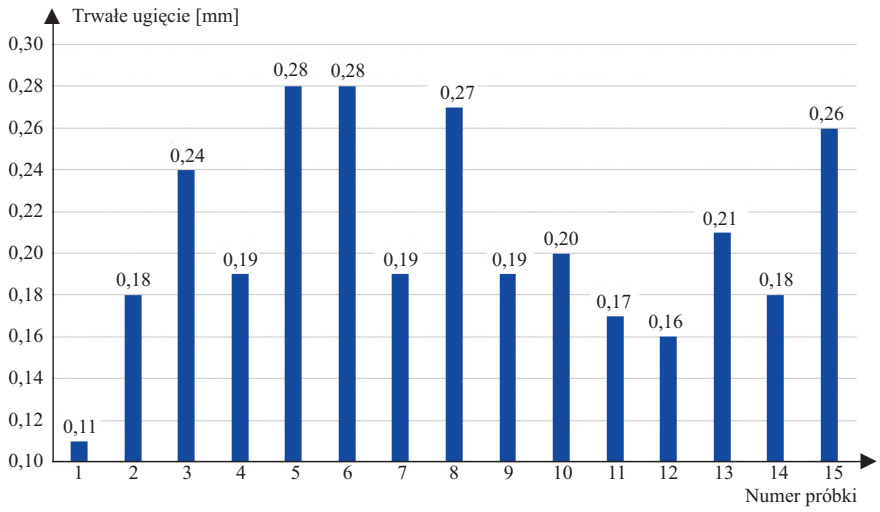
● **pomiaru trwałego ugięcia czołowego profili** po cyklicznych obciążeniach;

● **za pomocą spektroskopii impedancyjnej EIS** – przez pomiar impedancji układu metal/powłoka/elektrolit przy częstotliwości 0,01 – 100 kHz i amplitudzie sygnału 50 mV. Jako elektrolit zastosowano 3% wodny roztwór NaCl o małej rezystancji w porównaniu z impedancją badanego układu. Rejestrowano zależność logarytmu modułu impedancji |Z| w funkcji częstotliwości sygnału pomiarowego (układ Bodego). Do pomiaru użyto elektrody platynowej. Po zakończeniu obciążania profili zainstalowano celki pomiarowe. Pomiar wykonywano po 24 h od wprowadzenia elektrolitu do celki pomiarowej.

Wyniki i ich ocena

Wyniki pomiaru ugięcia w efekcie działania cyklicznych obciążeń mechanicznych przedstawiono na rysunku 1, zaś odporności korozyjnej na działanie kwaśnej mgły solnej w tabeli 3, wilgoci kondensacyjnej w tabeli 4, wilgotnej atmosfery SO_2 w tabeli 5, natomiast występowanie korozji nitkowej w tabeli 6.

Badanie odporności na cykliczne obciążenia mechaniczne profili aluminiowych pokrytych powłoką poliestrową, metodą trójpunktowego zginania siłą przyłożoną w osi próbki podpartej w dwóch podporach, o rozpiętości 0,6 m, wykazały, że uległy one trwałemu odkształceniu plastycznemu po ugięciu czołowym dla strzałki l/150 wynoszącym 4 mm. Po 2000 cyklach obciążeniowych z częstotliwością 0,5 Hz trwałe ugięcie profili wynosiło maksymalnie 0,28 mm. Odkształcenie stopów aluminium wiąże się ze zmianami w ich strukturze. Najmniejsze, niewidoczne okiem nieuzbrojonym, powodują znaczne zmiany w budowie mikrostruktury w przypadku odkształceń sprężystych lub plastycznych. Odkształcenie sprężyste metali zachodzi przez przemieszczanie się atomów na odległość nie większą niż sieciowa, dzięki czemu nie następują zasadnicze zmiany w ułożeniu atomów w sieci, a tylko zwiększenie energii ciała odkształcanego. W analizowanym przypadku mamy do czynienia z odkształceniem plastycznym pozostałym po ustąpieniu naprężeń. Pomimo trwałego odkształcenia próbek aluminium, poddanych cyklicznym obciążeniom mechanicznym, nie stwierdzono zmniejszenia odporności korozyjnej powłoki lakierowej w porównaniu z próbkami nieobciążonymi.



Rys. 1. Trwałe ugięcie czołowe profili po cyklicznych obciążeniach
Fig. 1. Permanent front deflection of profiles after cyclic loads

Tabela 3. Wyniki badania odporności na działanie kwaśnej mgły solnej (AASS)
Table 3. Results of test for resistance to acid salt spray (AASS)

Czas ekspozycji [h]	Rodzaj stwierdzonych zmian	
	próbki bez obciążeń mechanicznych	próbki po działaniu cykli zmęczeniowych
240	brak zniszczeń powłoki; brak występowania korozji nitkowej i podpowłokowej	brak zniszczeń powłoki; brak występowania korozji nitkowej i podpowłokowej
500	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 0,5 mm	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 1 mm
1000	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 1,5 mm	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 2 mm
1500	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 2,0 mm	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 2,5 mm

Tablica 4. Wyniki badania odporności na działanie wilgoci kondensacyjnej
Table 4. Results of test for resistance to condensation moisture

Czas ekspozycji [h]	Rodzaj stwierdzonych zmian	
	próbki bez obciążeń mechanicznych	próbki po działaniu cykli zmęczeniowych
240	brak zniszczeń powłoki; brak występowania korozji nitkowej i podpowłokowej	brak zniszczeń powłoki; brak występowania korozji nitkowej i podpowłokowej
500		
1000		
1500		

Tabela 5. Wyniki badania odporności na działanie wilgotnej atmosfery SO_2
Table 5. Results of tests of resistance to a humid SO_2 atmosphere

Liczba cykli	Ilość SO_2 [l]	Rodzaj stwierdzonych zmian	
		próbki bez obciążeń mechanicznych	próbki po działaniu cykli zmęczeniowych
5	0,2	brak zniszczeń powłoki; brak występowania korozji nitkowej i podpowłokowej	brak zniszczeń powłoki; brak występowania korozji nitkowej i podpowłokowej
10	0,2		
15	0,2		
20	0,2		
25	0,2	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 0,5 mm	brak zniszczeń powłoki; występowanie korozji nitkowej i podpowłokowej od nacięcia o długości 0,5 mm

Tabela 6. Wyniki badania odporności na korozję nitkową
Table 6. Test results for filiform corrosion resistance

Czas narażenia [h]	Nr próbki	Wynik badania	
		próbki bez obciążeń mechanicznych	próbki po działaniu cykli zmęczeniowych
1000	1	zaobserwowano zmiany w postaci pojedynczych nitek L2/M2 L_{max} = 2,0 mm	zaobserwowano zmiany w postaci pojedynczych nitek L2/M2 L_{max} = 2,1 mm
	2	zaobserwowano zmiany w postaci pojedynczych nitek L3/M1 L_{max} = 2,5 mm	zaobserwowano zmiany w postaci pojedynczych nitek L2/M2 L_{max} = 2,4 mm
	3	zaobserwowano zmiany w postaci pojedynczych nitek L2/M1 L_{max} = 2,3 mm	zaobserwowano zmiany w postaci pojedynczych nitek L3/M1 L_{max} = 3,0 mm

L – długość najdłuższej nitki; M – długość nitek występujących najczęściej; L_{max} – długość najdłuższej nitki

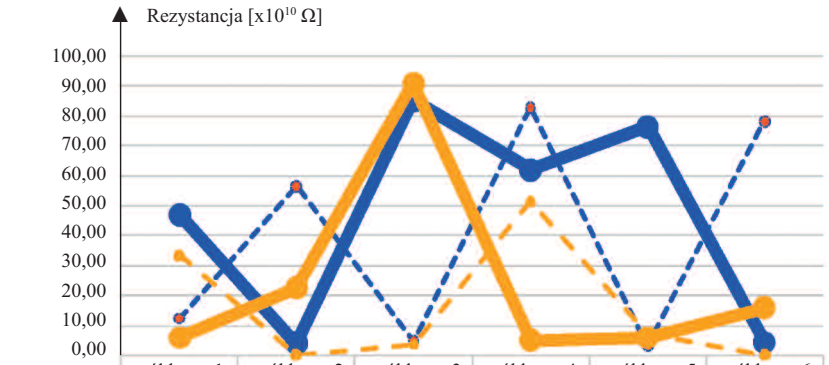
Podczas badania na działanie kwaśnej mgły solnej na próbkach z nacięciem krzyżowym w obu przypadkach stwierdzono pojawienie się korozji nitkowej i podpowłokowej. Jedynie nieznacznie większą długość infiltracji od nacięcia stwierdzono na próbkach, które były obciążane w maszynie wytrzymałościowej. Korozja od nacięcia krzyżowego pojawiła się również po ekspozycji próbek na działanie wilgotnej atmosfery zawierającej SO_2. Rozmiar korozji podpowłokowej próbek obciążanych mechanicznie był zbliżony do próbek nieodkształcanych (świadków).

W badaniu odporności na korozję nitkową porównywalne były zmiany również na próbkach poddanych wcześniej obciążeniom mechanicznym i próbkach świadkach. Najdłuższa nitka na próbkach po obciążeniach mechanicznych miała 3,0 mm. W przypadku próbek niepoddanych cyklom zmęczeniowym nie stwierdzono nitek o długości większej niż 2,5 mm.

Ocena wpływu cyklicznych obciążeń mechanicznych na odporność korozyjną powłok poddanych następnie działaniu czynników chemicznych nie pozwoliła na ustalenie mechanizmów pojawiania się uszkodzeń. Zarówno w przypadku próbek po wcześniejszych obciążeniach mechanicznych, jak i próbek świadków nie zaobserwowano zniszczeń korozyjnych w postaci spęcherzenia, złuszczenia, czy spękania powłoki poliestrowej. Przyczepność oraz twardość powłoki po testach korozyjnych w kwaśnej mgle solnej, wilgotnej atmosferze zawierającej SO_2 oraz w przypadku wilgoci kondensacyjnej nie uległa zmianie. Dopiero badanie spektroskopii impedancyjnej EIS pozwoliło na uzyskanie precyzyjnej oceny wpływu cyklicznych obciążeń zmęczeniowych na jakość powłoki lakierowej. Wyniki tych badań przedstawiono na rysunku 2.

Porównując wartość rezystancji próbek niepoddanych działaniu cykli zmęczeniowych i tych po cyklicznych obciążeniach mechanicznych widać wyraźną tendencję zmniejszania się wartości w przypadku powłok narażonych na obciążenia mechaniczne. W obu przypadkach wartości uzyskane w badaniach są wyższe od 10^8 Ω, czyli powłoki poddane uprzednio cyklom obciążeniowym wykazują właściwości barierowe. Stwierdzona niewielka utrata szczelności powłoki lakierowej po działaniu obciążeń mechanicznych nie powoduje znacznych zniszczeń korozyjnych. Potwierdza to prostoliniowy, nachylony pod kątem ok. 45° do osi odciętych, przebieg zależności logarytmu modułu impedancji od częstotliwości. Uzyskane wyniki pozwalają sądzić, że poliestrowe powłoki lakierowe wykazują dużą odporność korozyjną, nawet w przypadku oddziaływania powtarzających się obciążeń mechanicznych. Należy jednak pamiętać, że za skuteczną ochronę antykorozyjną odpowiedzialna jest również obróbka chemiczna powierzchni stopów aluminium. Uzyskane wyniki badań potwierdzają, że zastosowanie obróbki na bazie związków Ti stanowi alternatywę dla chromianowania.

Niestety tendencja spadkowa dotycząca rezystancji powłoki lakierowej wyraźnie zaznacza się w przypadku próbek poddanych mechanicznym obciążeniom zmęczeniowym, a następnie korozyjnym oddziaływaniom chemicznym. Należy pamiętać, że profile w środowisku zurbanizowanym, oprócz obciążeń mechanicznych, narażone są na oddzia- ▶



	próbka nr 1	próbka nr 2	próbka nr 3	próbka nr 4	próbka nr 5	próbka nr 6
seria 1	46,8	3,74	85,10	61,80	76,30	4,15
seria 2	12,20	56,60	4,80	83,10	3,04	78,20
seria 3	5,54	22,40	91,00	4,75	5,65	15,70
seria 4	33,20	0,0001	3,45	51,40	6,96	0,0006

Rys. 2. Wyniki badania rezystancji powłoki lakierowej na profilach aluminiowych ze stopu EN AW-6063 odpowiednio: seria 1– rezystancja wyjściowa profili niepoddanych cyklicznym obciążeniom mechanicznym; seria 2 – rezystancja profili niepoddanych cyklicznym obciążeniom mechanicznym, po działaniu kwaśnej mgły solnej podczas 1500 h; seria 3 – rezystancja wyjściowa profili po 2000 cykli obciążeń mechanicznych dla strzałki ugięcia l/150; seria 4 – rezystancja profili po 2000 cykli obciążeń mechanicznych dla strzałki ugięcia l/150, po działaniu kwaśnej mgły solnej przez 1500 h
Fig. 2. Comparative summary of the resistance test results of the coating applied on aluminum profiles made of the EN AW-6063 alloy, respectively: series 1 – output resistance for profiles not subjected to cyclic mechanical loads; series 2 – resistance for profiles not subjected to cyclic mechanical loads, afteracid salt spray test for 1500 hours; series 3 – output resistance for profiles after 2000 cycles of mechanical loads for the l /150 deflection arrow; series 4 – resistance for profiles after 2000 cycles of mechanical loads for the deflection arrow l/150, after acid salt spray test for 1500 hours

ARBOCEL P – The Power of Innovation

– nieograniczone możliwości regulacji konsystencji,
– łatwe i szybkie mieszanie,
– zagęszczanie i stabilizacja tynków i farb przy jednoczesnej poprawie aplikacji

JRS

Rettenmaier Polska
Sp. z o.o.
Bitwy Warszawskiej 1920 r. 7B
02-366 Warszawa
mobile +48 600 423 423
Tel + 48 22 608 51 00
e-mail: arbocel@jrs.pl

ływania chemiczne np. soli odladzających, stosowanych w okresie zimowym. Działania takie odzwierciedla badanie w kwaśnej mgle solnej, w którym widoczne było pogorszenie właściwości barierowych powłok poddanych uprzednio działaniu cyklicznych obciążeń zmęczeniowych. W dwóch badanych przypadkach uzyskano wartości rezystancji 10^5 i 10^6 Ω, co wskazuje na słabe właściwości barierowe. Wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że powtarzające się obciążenia mechaniczne, działające na profile aluminiowe zabezpieczone powierzchniowo powłokami ochronnymi, przy jednoczesnych działaniach czynników chemicznych mogą stanowić przyczynę mikrouszkodzeń w strukturze tych powłok, pogarszając ich właściwości barierowe, co prowadzi do stopniowego zmniejszenia odporności korozyjnej.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki badania odporności korozyjnej stopu EN AW-6063 z poliestrową proszkową powłoką lakierową. Ze względu na niewielką liczbę próbek nie można jednoznacznie stwierdzić, że obciążenia mechaniczne dopuszczane przez normę EN 12210 wpływają na odporność korozyjną powłok poliestrowych naniesionych na aluminium. Przedstawione wyniki należy traktować jako istotne i wymagające dalszych badań. Można jednak wyciągnąć następujące wnioski:

- cykliczne obciążenia mechaniczne profili aluminiowych, zabezpieczonych powłoką poliestrową naniesioną metodą lakierowania proszkowego, nie zmniejszają ich odporności korozyjnej na działanie kwaśnej mgły solnej, wilgotnej atmosfery zawierającej SO_2 oraz wilgoci kondensacyjnej, powodując jedynie trwałe odkształcenie plastyczne;
- ocena odporności korozyjnej powłok po działaniu czynników chemicznych za pomocą metod podanych w [7, 8, 13, 14] nie pozwoliła na rzeczywistą ocenę mechanizmów pojawiania się uszkodzeń. Dopiero metoda spektroskopii impedancyjnej umożliwia identyfikację mikrouszkodzeń wpływających na zmniejszenie odporności korozyjnej powłoki;
- obróbka chemiczna powierzchni aluminium wykorzystująca związki Ti może stanowić alternatywę dla chromianowania;
- w przypadku jednoczesnego działania cyklicznych obciążeń mechanicznych i chemicznych może następować zmniejszenie odporności korozyjnej poliestrowej proszkowej powłoki lakierowej określonej zmniejszeniem rezystancji nawet do 10^5 i 10^6 Ω.

Fotografie: Autorzy

Literatura

[1] Dunder O., C. Simense, Y. Tu, K. Nisancioglu. 2004. *Surface and Coating Technology* (184): 278.

[2] Evangelos Efthymiou, Öget N. Cöcen and Sergio R. Ermolli. 2010. „Sustainable Aluminium Systems". *Sustainability* 2 (9): 3100 – 3109.

[3] Kossakowski Paweł, Wiktor Wciślik, Michał Bakalarz. 2017. „Selected aspects of application of aluminium alloys in building structures". *Structure and Environment*: 256 – 263.

[4] Kwiatkowski T. 2012. „Aluminium w nowoczesnych konstrukcjach budowlanych (Aluminium in modern civil structures)". *Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo* 18 (168): 108 – 115.

[5] Lane J. 2018. Aluminium in Building – Routledge Revivals.

[6] PN-EN ISO 2360:2006 Powłoki nieprzewodzące na podłożu niemagnetycznym przewodzącym elektryczność – Pomiar grubości powłok – Metoda amplitudowa prądów wirowych.

[7] PN-EN ISO 2409:2013 Farby i lakiery – Badanie metodą siatki nacięć.

[8] PN-EN ISO 2815:2004 Farby i lakiery – Próba wciskania według Buchholza.

[9] PN-EN 12210:2016 Okna i drzwi – Odporność na obciążenie wiatrem – Klasyfikacja.

[10] PN-EN ISO 9227:2017 Badania korozyjne w sztucznych atmosferach – Badania w rozpylonej solance.

[11] PN-EN ISO 6270-1:2018 Farby i lakiery – Oznaczanie odporności na wilgoć – Część 1: Kondensacja ciągła.

[12] PN-EN ISO 3231:2000 Farby i lakiery – Oznaczanie odporności na wilgotne atmosfery zawierające ditlenek siarki.

[13] PN-EN ISO 4623-2:2005 Farby i lakiery – Oznaczanie odporności na korozję nitkową – Część 2: Podłoża aluminiowe.

[14] PN-EN ISO 4628-10:2005 Farby i lakiery – Ocena zniszczenia powłok – Określanie ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 10: Ocena stopnia korozji nitkowej.

[15] Winiarski J., B. Szczygieł. 2010. „Odporność na korozję powłok konwersyjnych otrzymywanych z roztworów zawierających związki Ti(III)". *Ochrona przed korozją* 53 (3): 133 – 136.

[16] Zhu L., F. Yang, N. Ding. 2007. *Surface and Coating Technology* (201): 7829.

Przyjęto do druku: 26.05.2021 r.