



Ochrona antykorozyjna infrastruktury drogowej a zrównoważony rozwój

Nowe podejście do analizy finansowej, polegające na sumowaniu wszystkich kosztów związanych z posiadaniem danego zasobu w całym okresie jego użytkowania, oraz konieczność szacowania wpływu produktu lub procesu na środowisko naturalne, klimat i zużycie zasobów na każdym etapie jego istnienia wymuszają zmiany w koncepcji doboru zabezpieczeń antykorozyjnych konstrukcji stalowych. Jednym z głównych elementów obu tych strategii jest wydłużenie trwałości, w tym przypadku zabezpieczeń antykorozyjnych.

W artykule zaprezentowano parametry, które powinny wpływać na dobór zabezpieczeń antykorozyjnych pod kątem wymaganej trwałości. Omówiono standardowe i nowoczesne systemy zabezpieczeń antykorozyjnych. Zasygnalizowano zmiany organizacyjne i prawne, które pomogą wprowadzić w życie nowe wymagania.

EKONOMICZNE I ŚRODOWISKOWE KOSZTY KOROZJI

Koszty korozji (bezpośrednie i pośrednie) stanowią ok. 6–8% produktu krajowego brutto [1], czyli są wyższe niż bardzo wysokie



**dr inż.
Agnieszka Królikowska**
Instytut Badawczy Dróg
i Mostów

ostatnio wydatki na obronność. Co najmniej połowę tych kosztów można zredukować, stosując znane procedury. Do tego jednak konieczne jest świadome podejście i – znając ułomność natury ludzkiej – uwzględnienie tych procedur w przepisach.

Światowa produkcja stali jest odpowiedzialna za ok. 10% emisji CO₂, a wymiana skorodowanej stali – za 3,4% całkowitej emi-

sji [2]. Procesy korozyjne i niewłaściwie przeprowadzone, skutkujące krótką trwałością prace antykorozyjne również wiążą się ze zwiększoną emisją CO₂, stratami materiałów (konstrukcyjnych i użytych do wykonania zabezpieczeń) oraz energii.

Ocena inwestycji uwzględniająca całkowity koszt posiadania (dalej: TCO) i ocenę cyklu życia (dalej: LCA) może stworzyć ramy do wyboru najbardziej opłacalnej oraz najlepszej dla środowiska metody ochrony antykorozyjnej [3]. W obu tych ocenach podstawowe znaczenie ma dobór optymalnej technologii i materiałów do założonej trwałości.

TCO (Total Cost Ownership – całkowity koszt posiadania)

to metodologia analizy finansowej, która określa sumę kosztów związanych z posiadaniem danego zasobu (produktu, usługi, systemu) w całym okresie jego użytkowania: od zakupu, przez wdrożenie i eksploatację, aż po utylizację.

LCA (Life Cycle Assessment – ocena cyklu życia)

to kompleksowa metodologia określania wpływu produktu, procesu, technologii lub usługi na środowisko w całym cyklu ich życia: od wydobycia surowców, przez produkcję i użytkowanie, aż po utylizację lub recykling.

POWŁOKI ANTYKOROZYJNE NA OBIEKTACH INFRASTRUKTURY

Najwyższa trwałość zabezpieczeń antykorozyjnych na obiektach stalowych, zgodnie z normą PN-EN ISO 12944-2:2022 [4], może przekraczać 25 lat. Z kolei w najnowszych dokumentach niemieckich zawartych w BLATT 100 [5] podano, że trwałość systemów antykorozyjnych na obiektach mostowych ma wynosić ponad 50 lat! Jest to wyjście naprzeciw wymaganiom klimatycznym. Każdy metr kwadratowy zabezpieczeń antykorozyjnych to 100–300 kg emisji CO₂ [6].

Na dobór zabezpieczenia antykorozyjnego w danym kraju wpływają najczęściej:

- dokumenty obowiązujące w tej dziedzinie,
- wiedza osób dobierających zabezpieczenia,
- aktywność firm proponujących określone materiały i technologie,
- tradycje kraju,
- przywiązanie danego inwestora do stosowanych rozwiązań,
- koszty.

Parametry, które powinny wpływać na dobór zabezpieczeń antykorozyjnych do wymaganej trwałości w infrastrukturze miejskiej i drogowej w Polsce, to przede wszystkim: środowisko korozyjne, kształt konstrukcji i dostępność elementów, miejsce wykonywania prac oraz wymagania ekologiczne i ekonomiczne.

Środowisko korozyjne

W zaleceniach GDDKiA [7] i wytycznych WRM M-31 Ministerstwa Infrastruktury [8] jako korozyjne przyjmuje się środowiska C4 lub C5, pomimo tego, że opierając się stricte na normowych określeniach klasy środowiska, w wielu przypadkach można by uwzględnić także klasę C3. Pod uwagę bierze się 3 aspekty związane z trwałością:

- możliwe pogorszenie klasy środowiska korozyjnego ze względu na rosnący ruch samochodowy i tworzenie tzw. tuneli korozyjnych o zwiększonym zawilgoceniu pomiędzy powstającą wokół dróg zabudową lub ustawionymi ekranami;

- przedłużający się okres pomiędzy remontami, stwarzający potrzebę wydłużenia trwałości;
- niewłaściwe utrzymanie obiektów.

Zdarzają się sytuacje, w których klasyfikacja środowiska korozji atmosferycznej zgodnie z normą PN-EN ISO 12944-2 się nie sprawdza. Obiekty infrastruktury mogą się np. znajdować w strefie przemysłowej, gdzie środowisko należy charakteryzować stężeniami agresywnych substancji.

Tak było w przypadku obiektu mostowego koło Zakładów Azotowych w Puławach. Zastosowano tu farby niedobre do środowiska, w którym występuje wysokie stężenie związków azotu. Z tego powodu już w pierwszych miesiącach eksploatacji nastąpiła degradacja powłoki nawierzchniowej, obejmująca również zmianę jej koloru (fot. 1).

Nawet w obrębie jednego obiektu mogą występować strefy o różnych zagrożeniach korozyjnych. W przypadku infrastruktury drogowej taka sytuacja dotyczy np. szczelin (fot. 2), elementów połączonych bezpośrednio z gruntem (fot. 3a) lub umocowanych bez uszczelnienia w asfalcie (fot. 3b) oraz elementów narażonych na zaleganie wilgoci (fot. 4a–b). Należy wówczas zastosować specjalne zabezpieczenie takich miejsc, aby procesy korozyjne nie wystąpiły tam przedwcześnie.



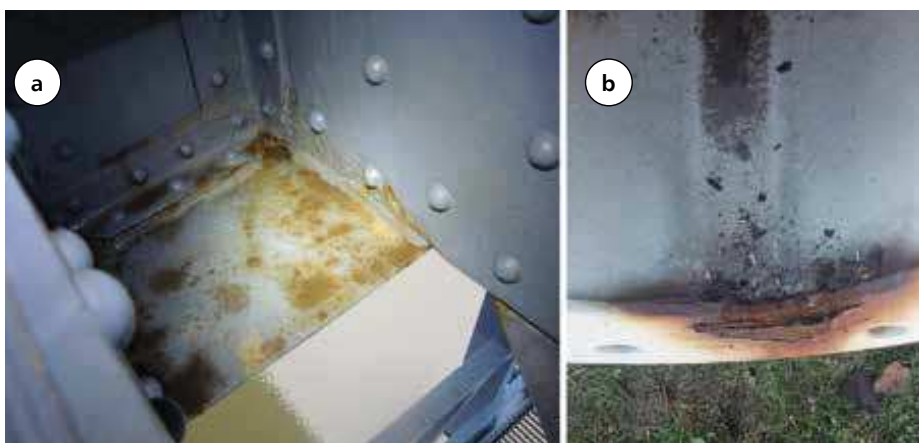
Fot. 1. Miejscowa degradacja powłoki nawierzchniowej w środowisku przemysłowym ze zwiększoną zawartością związków azotu



Fot. 2. Rozsadzone przez produkty korozji szczeliny w balustradzie mostu



Fot. 3. Widok korozji elementów stalowych: a) przechodzących przez asfaltowy chodnik i b) mających kontakt z gruntem



Fot. 4. Postępujące procesy korozyjne elementów mostowych, na których zalega woda

Kształt konstrukcji i dostępność elementów

W normie PN-EN ISO 8501-3 [9] podano wymagania dotyczące:

- minimalnych rozmiarów otworów w konstrukcjach, na których są wykonywane zabezpieczenia antykorozyjne;
- minimalnych wymiarów szczelin;
- zachowania typowych odległości dla narzędzi przy pracach antykorozyjnych;
- rozwiązań, które pozwalają uniknąć powstawania zastoin wody;
- przygotowania krawędzi przed malowaniem;
- przygotowania powierzchni spawanych przed malowaniem.

W normie PN-EN 15520 [10] podano dodatkowe wymagania – jeśli planuje się zastosować powłoki metalowe natryskiwane cieplnie – obejmujące:

- zapewnienie takiego dostępu do powierzchni, aby można było zastosować do nakładania powłoki pistolet metalizacyjny ustawiony pod kątem 90° do powierzchni w odległości 50 cm od niej;
- pełną widoczność powierzchni, na którą jest nakładana powłoka;
- brak otworów o małych promieniach wewnętrznych;
- brak wąskich szczelin oraz wąskich i ślepych otworów.

Przy nakładaniu tych powłok wydziela się wiele samozapalnego i samowysobuchowego pyłu cynku i/lub aluminium, który należy systematycznie usuwać. Ta technologia nie jest więc zalecana w elementach zamkniętych, takich jak skrzynki mostu.

Natomiast w razie nanoszenia powłoki cynkowej zanurzeniowej trzeba mieć świadomość, że:

- zastosowanie tej technologii jest ograniczone wymiarami elementu;
- w przypadku skomplikowanych elementów należy wykonać otwory umożliwiające wpłynięcie i wypłynięcie cynku;
- konstrukcje wiotkie mogą ulec odkształceniom;
- otwory poniżej 5 mm mogą zostać zalane;
- w spoinie, która ma pory i w której nie usunięto podtopień, cynk może nie wnikać w te miejsca i mogą z nich w przyszłości wypływać produkty korozji żelaza.

Miejsce wykonywania prac

Dąży się do tego, aby jak najwięcej prac antykorozyjnych było wykonywanych w wytwórniach, gdzie łatwiej zapewnić właściwe warunki niż w terenie. Ma to ogromne znaczenie zwłaszcza przy powłokach wymagających określonych i stabilnych warunków, takich jak powłoki etylokrzemianowe wysokocynkowe, utwardzające się pod wpływem wilgoci z powietrza (poziom wilgotności względnej powinien przekraczać 50%, a korzystnie – wynosić ok. 80–90%). Po nałożeniu tych powłok należy starannie usunąć suchy natrysk i ewentualnie, najpóźniej w ciągu godziny od nałożenia, uzupełnić grubość tam, gdzie jest za mała.

Prace scaleniowe konstrukcji czy renowacyjne, które muszą być wykonywane w warunkach polowych, należy przeprowadzać wtedy, kiedy panują warunki wymagane w kartach technicznych wyrobów, lub zastosować osłony i klimatyzację. Warto też pamiętać, że właściwe warunki powinny panować nie tylko podczas aplikacji powłoki, ale również w trakcie jej sezonowania.

Wymagania ekologiczne i ekonomiczne

Ocena TCO pokazuje w większości przypadków, że aby osiągnąć najkorzystniejsze ekonomicznie rozwiązanie, należy rozważać koszty nie tylko na etapie inwestycji, ale także podczas całego przewidywanego cyklu życia konstrukcji

(koszty utrzymaniowe, częstotliwość renowacji). Dlatego opłaca się np. zainwestować w systemy powłokowe o wysokiej trwałości oraz takie, które obniżą w przyszłości koszty remontu. Należą do nich systemy z gruntującą powłoką cynkową zanurzeniową, cynkową (lub aluminiową, albo cynkowo-aluminiową) natryskiwana cieplnie oraz etylokrzemianową wysokocynkową. Wszystkie te powłoki, jeśli zostaną dobrze zaaplikowane, mogą pozostać na powierzchni podczas remontu. W znaczący sposób obniża to koszty, ponieważ przygotowanie powierzchni stalowej do nakładania powłok jest najdroższym elementem procesu wykonania zabezpieczeń antykorozyjnych.

Warto również uwzględnić, jaką część kosztów wytworzenia konstrukcji stanowią zabezpieczenia antykorozyjne. W przypadku konstrukcji mostowych nie przekraczają one 3% budżetu inwestycji, a cena farb nie przekracza nigdy 10% tych kosztów. Biorąc pod uwagę TCO oraz LCA, które wiążą się z kosztami społecznymi, emisją substancji szkodliwych i CO₂, warto zastosować optymalne zabezpieczenie antykorozyjne.

STANDARDOWE I NOWOCZESNE SYSTEMY ZABEZPIECZEŃ ANTYKOROZYJNYCH

Do systemów standardowo stosowanych na stalowych konstrukcjach obiektów mostowych i balustradach drogowych należą [7, 8]:

- malarskie systemy powłokowe – z gruntem wysokocynkowym epoksydowym, etylokrzemianowym wysokocynkowym lub innym (najczęściej epoksydowym, rzadziej poliuretanowym);
- system duplex z powłoką cynkową, aluminiową lub cynkowo-aluminiową natryskiwana cieplnie;
- powłoka cynkowa zanurzeniowa;
- system duplex z powłoką cynkową zanurzeniową.

Wszystkie te systemy (z wyjątkiem samodzielnego zabezpieczenia cynkiem zanurzeniowym) zostały opisane w normie PN-EN ISO 12944-5, która proponuje zabezpieczenia antykorozyjne dla okre-

ślonych trwałości, dla podłoży stalowych, stalowych ocynkowanych zanurzeniowo i stalowych z powłoką metalową natryskiwana cieplnie, dla blach o grubości powyżej 3 mm. Systemy są dobrane do wszystkich środowisk atmosferycznych (od C1 do C5) oraz do konstrukcji eksploatowanych na pełnym morzu i narażonych na atmosferę morską, a także dla zanurzonych w wodzie słonej lub słonawej.

Nowymi na polskim rynku rozwiązaniami na potrzeby konstrukcji mostowych są:

- samodzielna powłoka cynkowa zanurzeniowa,
- samodzielna powłoka etylokrzemianowa wysokocynkowa (system jednopowłokowy),
- system dwupowłokowy z gruntem etylokrzemianowym wysokocynkowym i powłoką nawierzchniową etylokrzemianową,
- samodzielna powłoka cynkowa natryskiwana cieplnie.

Są one stosowane na świecie, a obecnie zyskują na znaczeniu w związku z dużo niższą emisją CO₂ niż w przypadku powłok organicznych oraz brakiem emisji mikroplastików.

Samodzielne powłoki etylokrzemianowe wysokocynkowe są od ponad 50 lat

znane w USA i Australii [11, 12]. W USA udokumentowano ich zastosowanie na ponad 50 mostach.

Jedna z dużych firm produkujących farby antykorozyjne wprowadziła do użytku dwupowłokowy system etylokrzemianowy, który składa się z gruntu wysokocynkowego i powłoki nawierzchniowej bez cynku w limitowanej gamie kolorów. Przemalowanie powłoki gruntującej jest możliwe już po 2 godzinach, ponieważ nawierzchniowa powłoka etylokrzemianowa nie blokuje utwardzania się powłoki gruntującej [13].

W Stanach Zjednoczonych stosuje się samodzielne zabezpieczenie obiektów mostowych powłoką metalową natryskiwana cieplnie. Obiekty mostowe zabezpieczone jedynie powłoką cynkową zanurzeniową funkcjonują z powodzeniem w wielu krajach od kilkudziesięciu lat.

Można mieć nadzieję, że te ekologiczne i ekonomiczne rozwiązania przyjmą się również w Polsce.

PODSUMOWANIE

- Nowe podejście do zabezpieczeń antykorozyjnych uwzględniające TCO oraz LCA wymaga wzrostu świadomości korozyjnej i wiedzy wśród ekspertów oraz inwestorów.



Fot. 5. Ostony pozwalające utrzymać właściwą wilgotność powietrza przy nakładaniu powłok etylokrzemianowych wysokocynkowych



Fot. 6. Proces zdejmowania z powłoki etylokrzemianowej wysokocynkowej suchego natrysku



• Nowoczesne produkty antykorozyjne należy jeszcze stale monitorować, żeby można było wybrać te najlepsze. Pozytywne przejście badań laboratoryjnych i uzyskanie krajowej oceny technicznej to dopiero pierwszy etap tej procedury.

• Szkolenie takich osób wymaga dużo szerszej wiedzy niż ta przekazywana na kursach inspektorskich.

• Bez zmiany prawa w tym zakresie w Polsce straty powodowane przez korozję nadal będą sięgały 6–8% PKB,

Nowoczesne produkty antykorozyjne należy jeszcze stale monitorować, żeby można było wybrać te najlepsze.

• Bardzo ważne byłoby monitorowanie przez odpowiednie organy (GDDKiA, zarządy dróg miejskich, wojewódzkich i powiatowych) zabezpieczeń antykorozyjnych obiektów położonych na podległych im terenach i udostępnianie tej wiedzy.

• Wymagania antykorozyjne powinny być nieodłączną częścią kursów na temat inżynierii mostowej i prawa budowlanego – obecnie brakuje bowiem specjalizacji antykorozyjnej.

• Specjalista antykorozyjny powinien uczestniczyć w każdym etapie procesu inwestycyjnego: tworzeniu istotnych warunków zamówienia, projekcie, akceptacji programu zapewnienia jakości, nadzorach i odbiorze po zakończeniu okresu gwarancji.

a środowisko będzie zanieczyszczane podczas częstych prac remontowych, bądź co gorsza, może dojść do katastrof związanych z problemami korozyjnymi. ■

Literatura

- [1] CC Technologies Laboratories, *Corrosion Costs and Preventive Strategies in the United States*, Study conducted in cooperation with FHWA and NACE, FHWA-RD-01-156, 2002 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne w ROSA P Repository and Open Science Access Portal: https://rosap.nhtl.gov/view/dot/39217/dot_39217_DS1.pdf.
- [2] Iannuzzi M., Frankel G.S., "The carbon footprint of steel corrosion" w *Materials Degradation*, vol. 6, art. 101, 2022 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne w Nature: <https://doi.org/10.1038/s41529-022-00318-1>.

- [3] Prošek T., Keil P., Popova K., "Corrosion Protection and Sustainability: Why Are the Two Concepts Inherently Intertwined" w *Corrosion and Materials Degradation*, vol. 6, no. 3, art. 38, Aug 2025 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne w MDPI: <https://doi.org/10.3390/cmd6030038>.
- [4] PN-EN ISO 12944-2:2018 Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 2: Klasyfikacja środowisk (polska wersja normy PN-EN ISO 12944-2:2018).
- [5] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (Aktualizacja Dodatkowych Warunków Technicznych i Wytycznych dla Obiektów Inżynierskich) (ZTV-ING) – Teil 4: Stahlbau, Stahlverbundbau – Abschnitt 3: Korrosionsschutz von Stahlbauten – Anhang C; C15 Planungshilfen für Blatt 100: 2K-Beschichtungssstoffe auf Epoxidharz- und Polyurethan-Basis (EP/PUR) auf Stahlblatt 100, Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur, 03.2021 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne w BAST Bundesanstalt für Straßen- und Verkehrswesen: https://www.bast.de/DE/Publikationen/Regelwerke/Ingenieurbau/ZTV-ING-4-3.pdf?__blob=publicationFile&v=1.
- [6] Piasecki M., Sudoł E., "Anticorrosion in building industry", referat wygłoszony na EUROCORR 2018, Kraków, 9–13 września 2018.
- [7] Królikowska A., *Zalecenia do wykonywania i odbioru antykorozyjnych zabezpieczeń konstrukcji stalowych drogowych obiektów mostowych* – nowelizacja 2006, załącznik do Zarządzenia nr 15 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 8 marca 2006 r., GDDKiA, Warszawa, 2006 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne w GDDKiA archive: https://www.archiwum.gddkia.gov.pl/userfiles/articles/m/materialy-pomocnicze-do-pobran_6608/documents/zalecenia-antykorozyjne-om.pdf.
- [8] Królikowska A., Komorowski L., Rymasz J. (koord.), WRM-M-31 – Wytyczne projektowania zabezpieczenia antykorozyjnego stalowych elementów drogowych obiektów inżynierskich, Wzorce i standardy rekomendowane przez Ministra właściwego ds. transportu, styczeń 2021 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne: <https://www.gov.pl/web/infrastruktura/wr-m>.
- [9] PN-EN ISO 8501-3:2008 Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów. Część 3. Stopnie przygotowania spoin, ostrych krawędzi i innych obszarów z wadami powierzchni.
- [10] PN-EN 15520:2025-01 Natryskiwanie cieplne. Zalecenia dotyczące zasad konstruowania części przeznaczonych do natryskiwania cieplnego.
- [11] Murphy T., Hopper T., McConnell J., "Single Coat Inorganic Zinc Protection for Steel Bridges", 2023 [dostęp 1.10.2025]. Dostępne w American Institute of Steel Construction: <https://www.aisc.org/globalassets/nsba/technical-documents/b305-23.pdf>.
- [12] Francis R., "Standard AS/NZS 2312 provides guidelines for selection and specification of coatings" w *Corrosion & Prevention*, Australasian Corrosion Association, 2014.
- [13] Blankenship K., Manuel J., "Two-Coat Inorganic Coating System for Steel Bridges" w *Transportation Research Record*, vol. 2679, iss. 5, 2025.