

dr inż. Agnieszka Królikowska¹⁾

ORCID: 0000-0002-0378-0386

prof. Pier Luigi Bonora²⁾mgr inż. Urszula Paszek^{1)*)}

ORCID: 0000-0002-6137-9099

Compulsory and forbidden actions in galvanized and Duplex coatings application

Konieczne i zabronione postępowanie przy aplikacji powłok cynkowych zanurzeniowych i systemów Duplex

DOI: 10.15199/33.2025.10.05

Abstract. HDG (Hot Dip Galvanized Coatings) and Duplex System are the protection methods widely used in various areas of the economy, including construction and infrastructure. This article aims to highlight the possible preventive interventions inherent to these mentioned protection technologies, dealing with the effects of steel composition, shape, dimensions and detailed structure of the parts to be hot dip galvanized as well as composition and other features of the molten Zinc bath. The dependency of the service life of the treated objects as a function of both environment and other metals connections are analyzed with life examples. The complex procedures suitable to provide a safe extension of both the inner zinc coating and the metal structure itself under the organic coating are examined together with possible mistakes and carelessness which might heavily affect the efficiency of the system.

Keywords: Hot-Dip Galvanized Coatings failures; Duplex System; HDG coatings service life.

The use of zinc coatings is one of the most effective means to protect steel products from corrosion. Depending on the geometry, the size of the product and its specifications, the techniques for deposition of the zinc layer are different: electrodeposition, hot dip galvanizing, spray galvanizing, coatings produced by plating mechanically or by diffusion (sherardizing) and finally organic coatings containing zinc powders.

Zinc is an extremely versatile, multi-purpose element. The strategic position of its electrochemical potential which is not so cathodic as to cause water reduction, but enough to produce effective cathodic protection to steel, allows zinc to be so widely used as anodic material, in form of coating (in air) or of bulk mass (e.g. in sea water) according to the conductivity of the environment [1, 2]. In the atmosphere, it withstands degradation by the production of a compact, protective patina of zinc oxycarbonate. It is also used as an anode material in batteries: a sheet of metal is used as the case in zinc-carbon batteries. Zinc is alloyed with copper to create brass, which is used in a wide variety of item such as pipes, instruments, communication equipment, hardware, and water valves. Many die and spin casting alloys contain Zinc. In liquid and

Streszczenie. Cynkowe powłoki ogniowe i system Duplex są metodami ochrony powszechnie stosowanymi w różnych dziedzinach gospodarki, w tym w budownictwie i infrastrukturze. W artykule wskazano możliwe interwencje zapobiegawcze związane z wymienionymi technologiami ochrony, zajmując się wpływem składu stali, kształtu, wymiarów i szczegółowej struktury części, które mają być cynkowane ogniowo, a także składu i innych cech kąpeli stopionego cynku. Przeanalizowano zależność żywotności obiektów poddanych obróbce w funkcji zarówno środowiska, jak i połączeń z innymi metalami na przykładach. Zbadano złożone procedury odpowiednie do zapewnienia bezpiecznego przedłużenia zarówno wewnętrznej powłoki cynkowej, jak i struktury metalowej pod powłoką organiczną wraz z możliwymi błędami i nieostrożnością, które mogą poważnie wpłynąć na efektywność systemu.

Słowa kluczowe: wady powłok cynkowanych ogniowo; system Duplex; trwałość powłok cynkowanych ogniowo.

Zastosowanie powłok cynkowych jest jednym z najskuteczniejszych sposobów ochrony wyrobów stalowych przed korozją. Wyroby stalowe chronione tą metodą obejmują zarówno małe elementy, takie jak śruby, wkręty, części samochodowe, jak i duże elementy, takie jak słupy, zbiorniki, rury. W zależności od geometrii, wielkości produktu i jego specyfikacji, techniki nakładania warstwy cynku są różne: elektroosadzanie, cynkowanie ogniowe, cynkowanie natryskowe, powłoki wytwarzane przez galwanizację mechaniczną lub dyfuzję (sherardyzacja) i wreszcie powłoki organiczne zawierające proszki cynku.

Cynk jest niezwykle wszechstronnym, wielofunkcyjnym pierwiastkiem. Strategiczne położenie jego potencjału elektrochemicznego, który nie jest tak katodowy, aby powodować redukcję wody, ale wystarczający do zapewnienia skutecznej ochrony katodowej stali, pozwala na szerokie zastosowanie cynku jako materiału anodowego, w postaci powłoki (w powietrzu) lub masy (np. w wodzie morskiej), w zależności od przewodności środowiska [1, 2]. W atmosferze jest odporny na degradację dzięki tworzeniu zwartej, ochronnej patyny z tlenku węglanu cynku. Jest również stosowany jako materiał anodowy w bateriach: blacha metalowa jest używana jako obudowa w bateriach cynkowo-węglowych. Cynk jest stopiony z miedzią w celu uzyskania mosiądzu, który jest wykorzystywany w wielu różnych produktach, takich jak rury, instrumenty, sprzęt komunikacyjny, sprzęt komputerowy i zawory wodne. Wiele stopów do odlewa-

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów²⁾ Past professor of Trento University

*) Correspondence address: urszula.paszek@ibdim.edu.pl

powder paints, Zinc is used as a pigment, both as a metal in zinc-rich primers and as a white oxide [3 ÷ 5]. Its role is not only to give cathodic and barrier protection but also corrosion inhibition and a chemical conversion trap for corrosive media [3, 6, 7]. Extensive research is being conducted, both in laboratory and field tests, on its role in protecting edges and mechanical damage to surfaces [8 ÷ 11]. HDG coatings are also modified to increase protection effectiveness and enable their use on a wider range of steels [12, 13]. With the ever-increasing importance of the ecological behavior of coatings, it turns out that the carbon foot-print of zinc coatings is much lower than that of traditional coating systems [14 ÷ 16]. The aim of the paper is to enhance the risks and challenges existing in exploiting the polyhedral features of zinc. In particular, the paper aimed to show how to avoid possible mistakes which might limit the service life of a structure protected by HDG or Duplex system.

The hot dip galvanizing process

The hot dip galvanizing process is carried out in galvanizing baths mainly at a bath temperature of approximately 450°C [13]. Various additives are added to the bath to influence the quality of the coating and facilitate the galvanizing process (Al, Ni, Pb, Bi, Sn, etc.). The galvanizing process is preceded by preparing the surface of steel elements in a degreasing bath to remove dirt and grease, then an acid bath to remove corrosion products and possibly remnants of organic coatings, and fluxing.

Zinc-iron intermetallic layers are formed in the galvanizing bath, most often with a layer of pure zinc on the surface. After the galvanizing process, the elements are assessed and any coating defects are removed (contamination with fluxes, hard zinc, under-galvanization, etc.). The coatings created in this way provide a cathodic and barrier protection to the steel. The tightly adhered coating, which has a high bond strength around 70 DPN (Diamond Pyramid Number or Vickers Hardness Number VHN) for phase eta; 170 DPN for the phase zeta; 244 DPN for the phase delta and 250 DPN for the phase gamma), is also extremely abrasion-resistant, as the intermetallic layers are harder than the base steel [17, 18]. Moreover, even if the coating were locally damaged, zinc's sacrificial action will protect exposed steel up to 5-6 mm away. Another advantage of HDG coatings is the carbon footprint more than twice lower compared to painting systems [16].

Selection of steel for galvanizing

The most common reason for galvanized steel having different appearances is the chemistry of the steel pieces. There are two elements of steel chemistry which most strongly influence on the final appearance: silicon and phosphorous [19 – 20]. Both elements are catalysts to coating growth, and the thicker coating is responsible for the differing appearance. Silicon is added during the steel making process to deoxidize it. The recommended silicon composition for steel to be galvani-

nia ciśnieniowego i odlewania odśrodkowego zawiera cynk. Zarówno w farbách płynnych, jak i proszkowych cynk jest stosowany jako pigment, zarówno jako metal w podkładach bogatych w cynk, jak i jako biały tlenek [3 ÷ 5]. Jego rola polega nie tylko na zapewnieniu ochrony katodowej i barierowej, ale także na hamowaniu korozji i chemicznej konwersji mediów korozyjnych [3, 6, 7]. Prowadzone są szeroko zakrojone badania, zarówno laboratoryjne, jak i terenowe, dotyczące jego roli w ochronie krawędzi i uszkodzeń mechanicznych powierzchni [8 ÷ 11]. Powłoki cynkowe ogniowe są również modyfikowane w celu zwiększenia skuteczności ochrony i umożliwienia ich stosowania na szerszej gamie stali [12, 13]. Wraz z rosnącym znaczeniem ekologiczności powłok okazuje się, że ślad węglowy powłok cynkowych jest znacznie niższy niż w przypadku tradycyjnych systemów powłokowych [14 ÷ 16]. Celem niniejszego artykułu jest podkreślenie ryzyka i wyzwań związanych z wykorzystaniem wielościennych właściwości cynku. W szczególności artykuł ma na celu pokazanie, jak uniknąć potencjalnych błędów, które mogą ograniczyć żywotność konstrukcji chronionej przez powłoki cynkowe ogniowe lub system Duplex.

Proces cynkowania ogniowego

Proces cynkowania ogniowego odbywa się w kąpielach cynkowych, głównie w temperaturze około 450°C [13]. Do kąpeli dodaje się różne dodatki, które wpływają na jakość powłoki i ułatwiają proces cynkowania (Al, Ni, Pb, Bi, Sn itp.). Proces cynkowania poprzedza przygotowanie powierzchni elementów stalowych w kąpeli odtłuszczającej w celu usunięcia brudu i tłuszczu, a następnie w kąpeli kwasowej w celu usunięcia produktów korozji i ewentualnych pozostałości powłok organicznych oraz topienia.

W kąpeli cynkowej tworzą się międzymetaliczne warstwy cynku i żelaza, najczęściej z warstwą czystego cynku na powierzchni. Po procesie cynkowania elementy są oceniane i usuwane są wszelkie wady powłoki (zanieczyszczenia topnikami, twardym cynkiem, niedocynkowaniem itp.). Powłoki utworzone w ten sposób zapewniają ochronę katodową i barierową stali. Mocno przylegająca powłoka, która ma wysoką wytrzymałość wiązania około 70 DPN (Diamond Pyramid Number lub Vickers Hardness Number [VHN]) dla fazy eta; 170 DPN dla fazy zeta; 244 DPN dla fazy delta i 250 DPN dla fazy gamma), jest również wyjątkowo odporna na ścieranie, ponieważ warstwy międzymetaliczne są twardsze niż stal bazowa [17, 18]. Ponadto, nawet jeśli powłoka ulegnie lokalnemu uszkodzeniu, działanie ochronne cynku zapewni ochronę odsłoniętej stali w odległości do 5-6 mm. Kolejną zaletą powłok cynkowych ogniowych jest ich ślad węglowy, który jest ponad dwukrotnie niższy w porównaniu z systemami malarskimi [16].

Wybór stali do cynkowania

Proces cynkowania ogniowego, pozornie prosty, jest w rzeczywistości skomplikowanym procesem, w którym wiele parametrów ma wpływ na uzyskanie odpowiedniej liczby i wielkości nakładających się warstw o właściwym składzie. Najczęstszą przyczyną różnic w wyglądzie stali ocynkowanej jest skład chemiczny elementów stalowych. Na ostateczny wygląd naj-

zed is either less than 0.03% or between 0.15% and 0.25% (ISO 14713) [21]. Steels with silicon content above these ranges are considered as reactive steels and can be expected to form zinc coatings thicker than average. Chart below (Figure 1) compares the zinc coating thickness to the mass percentage of silicon and phosphorus in the steel. In addition to producing thicker coatings, highly reactive steels tend to have a matte gray or mottled appearance instead of a typical bright coating. This difference in appearance is a result of the rapid zinc-iron intermetallic growth. This growth of the intermetallic layer is out of the galvanizer's control; however, if the steel composition is known beforehand, some process controls are available to minimize the effect. Photo 1 shows the differences between the alloy formations on steel with recommended silicon ranges and those of reactive steels. Photo 2 shows how the wrong type of steel may result in dull, brittle coatings with poor adhesion to the steel.

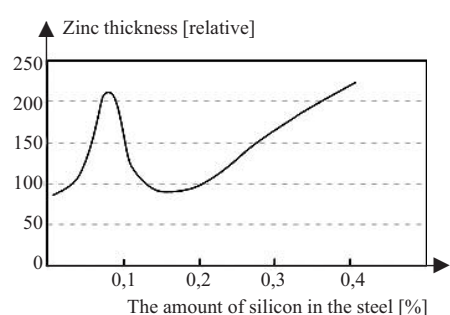


Fig. 1. HDG coating thickness depending on the amount of silicon in the steel [21]

Rys. 1. Grubość powłoki cynkowej ogniowej w zależności od ilości krzemu w stali [21]

większy wpływ mają dwa pierwiastki występujące w stali: krzem i fosfor [19–20]. Oba pierwiastki są katalizatorami wzrostu powłoki, a grubsza powłoka jest odpowiedzialna za różny wygląd. Krzem jest dodawany podczas procesu produkcji stali w celu jej odtlenienia. Zalecana zawartość krzemu w stali przeznaczonej do cynkowania wynosi poniżej 0,03% lub między 0,15% a 0,25% (ISO 14713) [21]. Stale o zawartości krzemu powyżej tych zakresów są uważane za stale reaktywne i można oczekiwać, że utworzą powłoki cynkowe grubsze niż średnia. Poniższy wykres (rysunek 1) porównuje grubość powłoki cynkowej z procentową zawartością masową krzemu i fosforu w stali. Oprócz tworzenia grubszych powłok, stale wysoce reaktywne mają zazwyczaj matowy szary lub cętkowany wygląd zamiast typowej jasnej powłoki. Ta różnica w wyglądzie wynika z szybkiego wzrostu międzymetalicznej warstwy cynkowo-żelazowej. Wzrost warstwy międzymetalicznej jest poza kontrolą cynkowni, jednak jeśli skład stali jest znany z góry, istnieją pewne środki kontroli procesu, które pozwalają zminimalizować ten efekt (fotografia 1). Zastosowanie niewłaściwego rodzaju stali może skutkować matowymi, kruchymi powłokami o słabej przyczepności do stali (fotografia 2).

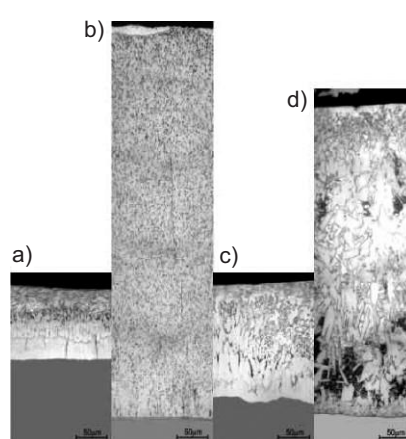


Photo 1. Cross-section of HDG coating on low silicon [%] Si+P < 0,03: a) Sandelin 0,03 > [%] Si+P < 0,13; b) 0,13 > [%] Si+P < 0,28 Sebisty; c) and high silicon content [%] Si+P ≥ 0,28; d) steel [13]

Fot. 1. Przekrój powłoki cynkowej ogniowej na stali o niskiej zawartości krzemu [%] Si+P < 0,03: a) Sandelin 0,03 > [%] Si+P < 0,13; b) 0,13 > [%] Si+P < 0,28 Sebisty; c) i wysokiej zawartości krzemu [%] Si+P ≥ 0,28; d) stal [13]

Errors in preparing elements for galvanizing

Thick corrosion products, old paint coatings, remains of surface preparations, from previous surface treatments need to be removed before the galvanizing process begins (Photo 3a). The acidic/alkaline bathes can remove most of the contaminants from the surface. Also those parts previously submitted to heat treatments should be sand-blasted in order to recover an uniform surface reactivity and a consequent uniform appearance of the zinc coating. In addition, zinc is unable to penetrate narrow cracks, pores in the welds and similar places, from which corrosion pro-

Błędy w przygotowaniu elementów do cynkowania

Przed rozpoczęciem procesu cynkowania należy usunąć grube produkty korozji, stare powłoki malarskie, pozostałości po przygotowaniu powierzchni, pochodzące z poprzednich obróbek powierzchniowych (fotografia 3a). Kwaśne/zasadowe kąpiele mogą usunąć większość zanieczyszczeń z powierzchni. Również te części, które wcześniej poddano obróbce cieplnej, powinny zostać poddane piaskowaniu w celu uzyskania jednolitej reaktywności powierzchni i w konsekwencji jednolitego wyglądu powłoki cynkowej. Ponadto cynk nie jest w stanie wnikać w wąskie pęknięcia, pory w spoinach i podobne miej-



Photo 2. Consequences of the use of wrong type of steel: a) dull HDG coating with cracks and local delamination; b) brittle HDG coatings with poor adhesion to the steel; c) dull, brittle coatings with poor adhesion to the steel

Fot. 2. Skutki zastosowania nieodpowiedniej stali: a) matowa powłoka cynkowa ogniowa z pęknięciami i miejscowymi rozwarstwieniami; b) kruche powłoki cynkowe ogniowe o słabej przyczepności do stali; c) matowe, kruche powłoki o słabej przyczepności do stali

ducts should outflow (Photo 3b). Many parts require the introduction of special holes to ensure proper zinc flow. The lack of such holes may result in under-galvanization, large zinc thickenings or even an explosion of these elements (Photo 3c).

sca, z których powinny wypływać produkty korozji (fotografia 3b). Wiele części wymaga wykonania specjalnych otworów, aby zapewnić prawidłowy przepływ cynku. Brak takich otworów może skutkować niedocynkowaniem, dużymi zgrubieniami cynku, a nawet eksplozją tych elementów (fotografia 3c).



Photo 3. Effects of incorrect steel surface preparation before galvanizing: a) surface preparation defects and lack of technological holes; b) leaking corrosion products; c) view of a torn element after an explosion – lack of a hole for venting the structure

Fot. 3. Skutki nieprawidłowego przygotowania powierzchni stali przed cynkowaniem: a) wady przygotowania powierzchni oraz brak otworów technologicznych; b) wypływające produkty korozji; c) widok rozerwanego elementu po wybuchu – brak otworu na odpowietrzenie konstrukcji

Limitation of use of the HDG coatings

There are well-known limitations to the use of HDG coatings, such as environments with a pH value outside the range of 6.5 – 13 or immersion in seawater [22]. However, sometimes there are non-obvious situations in which HDG coatings fail prematurely. Examples of two such situations are highlighted below.

Behavior of HDG with addition of lead or bismuth in the bath in the crevices in chloride environment. Very quick corrosion in the cracks has been observed on galvanized posts along highways or expressways where de-icing salts are used in winter. After three years of operation, HDG coatings with a thickness of 200-250 μm corrode locally (Photo 4). After examination with a scanning microscope of selected samples, it turned out that the lead addition to zinc bath accelerates HDG coatings corrosion because of the strong pitting corrosion around lead inclusions [12, 13, 23, 24].

Temperature – lightning strike on poorly grounded masts protected by the system with HDG coating. At a power station located in a C3 environment according to the ISO 12944-2 [25] standard, after three years of exploitation, there was complete degradation of the coating system on steel masts, which were protected against corrosion with a coating system with an HDG coating. Visual assessment of the coatings indicated local cracking of the co-

Ograniczenia stosowania powłok cynkowych ogniowych

Istnieją dobrze znane ograniczenia stosowania powłok cynkowych ogniowych, takie jak środowiska o wartości pH poza zakresem 6,5 – 13 lub zanurzenie w wodzie morskiej [22]. Czasami jednak zdarzają się nieoczywiste sytuacje, w których powłoki cynkowe ogniowe ulegają przedwczesnemu uszkodzeniu. Poniżej przedstawiono dwa przykłady takich sytuacji.

Zachowanie powłoki cynkowej ogniowej z dodatkiem ołowiu lub bizmutu w kąpeli w szczelinach w środowisku chlorkowym. Bardzo szybką korozję w szczelinach zaobserwowano na ocynkowanych słupkach wzdłuż autostrad lub dróg ekspresowych, gdzie zimą stosuje się sole do odładzania. Po 3 latach eksploatacji powłoki cynowe ogniowe o grubości 200-250 μm ulegają lokalnej korozji (fotografia 4). Po zbadaniu wybranych próbek za pomocą mikroskopu skaningowego okazało się, że dodatek ołowiu do kąpeli cynkowej przyspiesza korozję powłok cynkowych ogniowych z powodu silnej korozji wżerowej wokół wtrąceń ołowiu [12, 13, 23, 24].

Temperatura – uderzenie pioruna w słabo uziemione maszty chronione przez system z powłoką cynkową ogniową. W elektrowni położonej w środowisku C3 zgodnie z normą ISO 12944-2 [25], po 3 latach eksploatacji nastąpiła całkowita degradacja systemu powłokowego na stalowych masztach, które były zabezpieczone przed korozją systemem powłokowym z powłoką cynkową ogniową. Ocena wizualna powłok

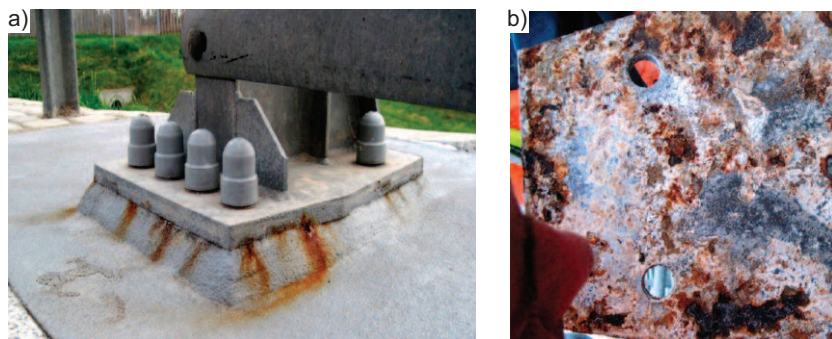


Photo 4. Corrosion in the crevices on galvanized posts along highways where de-icing salts are used in winter (a); view from the bottom of the corroded element (b)

Fot. 4. Korozja w szczelinach na ocynkowanych słupkach wzdłuż autostrad, gdzie zimą stosuje się sole odładzające (a); widok od spodu skorożowanego elementu (b)

atings and delamination. The laboratory test results were surprising. The IR spectrum of the coating removed from the mast indicates only the presence of inorganic substances (fillers). EDX analysis using

a) a scanning microscope showed a composition completely unusual for an organic coating (very small amount of carbon), but very high content of barium and sulfur, i.e. filler components contained in the original coating. It turned out that the masts were improperly grounded, and the storm discharges completely degraded the organic coatings (Photo 5a) and locally melted the HDG coating (Photo 5b) [26].

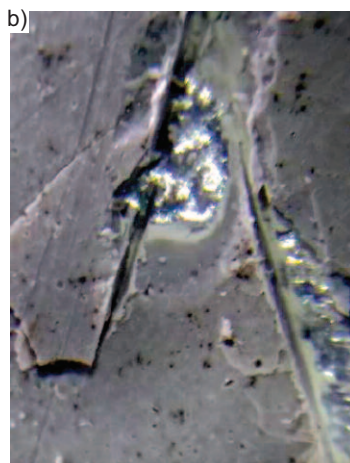


Photo 5. Destroyed organic coating: a) partially melted HDG coating; b) field microscope photos – magnification: 50x [26]

Fot. 5. Zniszczona powłoka organiczna: a) częściowo stopiona powłoka cynkowa ogniowa; b) zdjęcia z mikroskopu polowego – powiększenie: 50x [26]

organicznych (wypełniaczy). Analiza EDX przy użyciu mikroskopu skaningowego wykazała skład całkowicie nietypowy dla powłoki organicznej (bardzo małą ilość węgla), ale bardzo wysoką zawartość baru i siarki, tj. składników wypełniacza zawartych w oryginalnej powłoce. Okazało się, że maszty były nieprawidłowo uziemione, a wyładowania burzowe całkowicie zniszczyły powłoki organiczne (fotografia 5b) i miejscowo stopiły powłokę cynkową ogniową (fotografia 5a) [26].

Controversial requirements for HDG coatings included in the ISO 1461 standard

The ISO 1461 standard allows damage rate of the HDG coatings up to 0.5% total surface: no more than 10 cm² in one place. A possible example is a galvanized pole, C-section with dimensions 20 x 20 x 20 x 500 x 0,04 cm:

- total surface = 60 000 cm²;
- 0,5% of the surface allowed to have no HDG coating = 300 cm²;
- they could be located on the edges, so it could be 300 cm of damaged edges with the width of 1 cm.

It means that, in accordance to the standard, 50% of every edge could be damaged. The protection of the edges is a general problem in metallic coatings including HDG coatings. Possible solution of this problem is still under investigation. Detailed analysis of the edge protection in different environments including Al (Zn, Mg) coatings is given in some works [9 – 11].

Galvanic corrosion with HDG parts

Complex design requirements may require the connection of various metal materials into one component with the consequent use of separate parts, such as fasteners or washers. In some cases a galvanic cell is created which leads to corrosion of one of them. Risk of galvanic corrosion depends on many factors. In addition to the applied materials, a critical element is the environment and the design of the parts [27, 28]. Some such examples are shown in the article. Galvanized bolts coupled with a weathering steel plate in a wet environment (Photo 6). A viaduct on a river in a rural environment built in weathering steel is an example of those structures subjected to assemblies where high-strength bolts

Kontrowersyjne wymagania dotyczące powłok cynkowych ogniowych zawarte w normie ISO 1461

Norma ISO 1461 dopuszcza stopień uszkodzenia powłok cynkowych ogniowych do 0,5% całkowitej powierzchni: nie więcej niż 10 cm² w jednym miejscu. Możliwym przykładem jest ocynkowany słup o przekroju C o wymiarach 20 x 20 x 20 x 500 x 0,04 cm.

- całkowita powierzchnia = 60 000 cm²;
- 0,5% powierzchni, na której nie może być powłoki HGD = 300 cm²;
- mogą one znajdować się na krawędziach, więc może to być 300 cm uszkodzonych krawędzi o szerokości 1 cm.

Oznacza to, że zgodnie z normą 50% każdej krawędzi może być uszkodzone. Ochrona krawędzi stanowi ogólny problem w przypadku powłok metalicznych, w tym powłok cynkowych ogniowych. Możliwe rozwiązania tego problemu są nadal badane. Szczegółowa analiza ochrony krawędzi w różnych środowiskach, w tym powłok Al (Zn, Mg), została przedstawiona w niektórych pracach [9 – 11].

Korozja galwaniczna w przypadku elementów cynkowanych ogniowo

Złożone wymagania projektowe mogą wymagać połączenia różnych materiałów metalowych w jednym elemencie, co wiąże się z koniecznością stosowania oddzielnych części, takich jak elementy złączne lub podkładki. W niektórych przypadkach powstaje ogniwo galwaniczne, które prowadzi do korozji jednego z nich. Ryzyko korozji galwanicznej zależy od wielu czynników. Oprócz zastosowanych materiałów, kluczowym elementem jest środowisko i konstrukcja części [27, 28]. Poniżej przedstawiono kilka przykładów. Śruby ocynkowane połączone z płytą ze stali

are necessary. In fact, according to standards, the bolts must be made of the same weathering steel. Galvanized bolts were used instead. They are only suitable if the thickness of zinc is sufficient to allow time for the patina to develop. Thereafter, the potential difference between oxycarbonate-coated zinc and patinated weathering steel will be irrelevant. If the zinc were consumed prematurely the bolt will be anodic with respect to the weathering steel structure. The service life would depend mainly on the aggressiveness of the environment. This is the case shown in Photo 6, where the bolts situated in a protected location (right) were intact, while in other more exposed place started to corrode.

Use of the galvanized steel in the brackish water. A small arc supported bridge built in HDG Armco corrugated steel, collapsed because of heavy corrosion in the tidal zone of a brackish water canal. The consequent damages in the overpassing road caused incidents with injuries (Photo 7) [29].

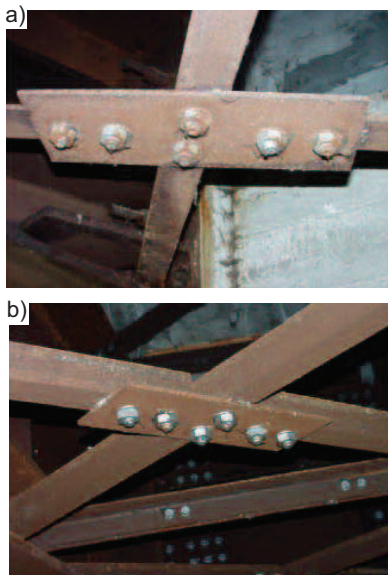


Photo 6. Corrosion of the HDG coating on a carbon steel bolt on a weathering steel bridge: a) over the water; b) over the meadow

Fot. 6. Korozja powłoki cynkowej ogniowej na śrubie ze stali węglowej na moście stalowym: a) nad wodą; b) nad łąką

odpornej na warunki atmosferyczne w wilgotnym środowisku (fotografia 6). Wiadukt nad rzeką w środowisku wiejskim, zbudowany ze stali odpornej na warunki atmosferyczne, jest przykładem konstrukcji wymagającej zastosowania śrub o wysokiej wytrzymałości. Zgodnie z normami śruby muszą być wykonane z tej samej stali odpornej na warunki atmosferyczne. Zastosowano jednak śruby ocynkowane. Są one odpowiednie tylko wtedy, gdy grubość powłoki cynkowej jest wystarczająca, aby umożliwić powstanie patyny. Wówczas różnica potencjałów między cynkiem pokrytym warstwą węglanu tlenku a patynowaną stalą odporną na warunki atmosferyczne będzie nieistotna. Jeśli cynk ulegnie przedwczesnemu zużyciu, śruba będzie anodowa w stosunku do konstrukcji ze stali odpornej na warunki atmosferyczne. Żywotność będzie zależała głównie od agresywności środowiska. Tak jest w przypadku przedstawionym na fotografii 6, gdzie śruby znajdujące się w miejscu chronionym były nienaruszone, podczas gdy w innych, bardziej narażonych miejscach zaczęły korodować.

Zastosowanie stali ocynkowanej w wodzie słonawej. Mały most łukowy zbudowany z blachy falistej cynkowanej ogniowo zawałił się z powodu silnej korozji w strefie pływów kanału słonawowodnego. Wynikające z tego uszkodzenia drogi nad wiaduktem spowodowały wypadki z ofiarami (fotografia 7) [29].

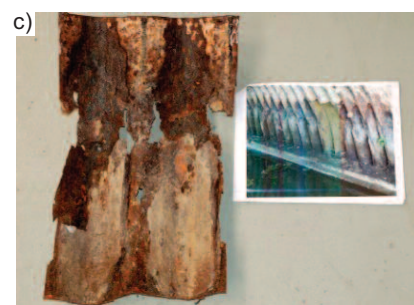


Photo 7. The arc supported bridge (a); road after the accident (b); destroyed fragment of galvanized construction (c) [29]
Fot. 7. Most łukowy (a); droga po wypadku (b); zniszczony fragment konstrukcji ocynkowanej (c) [29]

Use of galvanized anchor bolts in aggressive environment. The guardrails of a viaduct were designed using HDG steel anchor bolts subjected to corrosion in chloride containing environment (deicing salts). After a terrible accident, the anchor bolts were found as in the Figure 2, and the guard rails did not stand the impact with a bus, which actually fell from the viaduct. The only alternative was to keep anchor bolts and environment separated [29].

Zastosowanie ocynkowanych śrub kotwiących w agresywnym środowisku. Barierek wiaduktu zostały zaprojektowane z wykorzystaniem śrub kotwiących ze stali cynkowanej ogniowo poddanych korozji w środowisku zawierającym chlorki (sole do odładzania). Po strasznym wypadku śruby kotwiące znalazły się w stanie przedstawionym na rysunku 2, a bariereki nie wytrzymały uderzenia autobusu, który spadł z wiaduktu. Jedyną alternatywą było oddzielenie śrub kotwiących od środowiska [29].

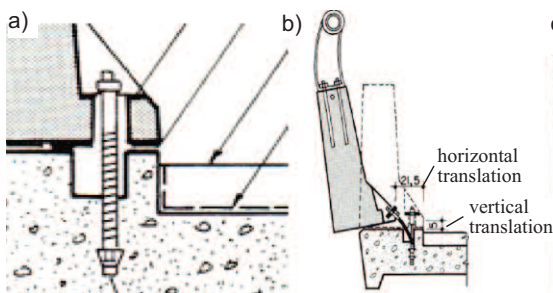


Fig. 2. Balustrade mounting diagram (drawings come from the design documentation provided as part of the expertise – a, b); damaged HDG steel anchor bolt (c) [29]

Rys. 2. Schemat montażu balustrady (rysunki pochodzą z dokumentacji projektowej udostępnionej w ramach ekspertyzy – a i b); uszkodzona stalowa kotwa z powłoką cynkową ogniową (c) [29]

Wrong use of a galvanic chain in aggressive environment. A succession of errors led to the ruin of the project of an ultra-modern boat for tuna fishing in the Pacific Ocean, equipped with a helicopter for spotting the shoal, motorboats for its encirclement and a hold for freezing tunas. Unfortunately, the water tanks for the heat exchanger, instead of stainless alloy, were built in HDG steel. Already during sea trials, corrosion had reached unsustainable levels. As a countermeasure, magnesium anodes were added, which were forced to function in excessive way, generating consequently a huge amount of corrosion products and hence an enormous pressure in the gap between the anode and the water tank, to which the anodes were fixed through stainless steel bolts. Eventually some of them broke explosively, producing even damages to the walls of the hold.

Duplex systems

Duplex system is an increasingly applied protection procedure for galvanized surfaces, because it combines aesthetic qualities with reliability: it consists in the application of an organic coating. Duplex systems are defined as the combination of a metallic coating (zinc or zinc-aluminum alloy) with an organic coating. These systems are used essentially for two reasons: the first is to increase the protective properties of galvanization especially in particularly aggressive environments, where the resistance of zinc is significantly reduced due to humidity and the presence of contaminating substances. The combination of a zinc coating followed by an organic one produces a synergistic effect (the protection of the duplex system is greater than the sum of the protection of – ferred by the zinc and organic coatings considered separately). Depending on the aggressiveness of the environment, it has been calculated that the durability of a structure protected with a Duplex system is 1.5 to 2.3 times greater than the protection offered by the sum of the two coatings considered separately [30, 31]. A second reason for preferring the application of an organic coating on a galvanized surface is given by the color of the product, when this is necessary for aesthetic reasons or for requests for particular colors (safety colors, signaling, camouflage...).

Surface preparation. One of the most important and problematic aspects of Duplex systems is the difficulty in obtaining adequate and long-lasting adhesion between the organic coating and substrate; therefore careful preliminary preparation of the surface to be coated is required. After galvanizing the HDG coating should have no:

- slag particles, zinc ash;
- droplets and sharp edges;
- traces of flux;
- drops of welding melt and welding slag;
- oil, dirt, dust and other contaminants;
- excessive white rust;
- paint residue or pen or marker marks;
- rusted or damaged areas.

In a neutral environment the zinc surface reacts with oxygen and air humidity to form various zinc hydroxides. These pro-

Niewłaściwe zastosowanie łańcucha galwanicznego w agresywnym środowisku. Seria błędów doprowadziła do upadku projektu ultranowoczesnego statku do połowu tuńczyków na Oceanie Spokojnym, wyposażonego w helikopter do wykrywania ławic, motorówki do ich otaczania oraz ładownię do zamrażania tuńczyków. Niestety, zbiorniki wodne dla wymiennika ciepła, zamiast ze stopu stali nierdzewnej, zostały wykonane ze stali cynkowanej ogniowo. Już podczas prób morskich korozja osiągnęła poziom uniemożliwiający dalszą eksploatację. Jako środek zaradczy dodano anody magnezowe, które były zmuszone do nadmiernej pracy, generując w konsekwencji ogromną ilość produktów korozji, a tym samym ogromne ciśnienie w szczelinie między anodą a zbiornikiem wody, do którego anody były przymocowane za pomocą śrub ze stali nierdzewnej. Ostatecznie niektóre z nich pękły z dużą siłą, powodując nawet uszkodzenia ścian ładowni.

Systemy Duplex

System dwuskładnikowy jest coraz częściej stosowaną procedurą ochrony powierzchni ocynkowanych, ponieważ łączy w sobie walory estetyczne z niezawodnością: polega on na nałożeniu powłoki organicznej. Systemy dwuwarstwowe definiuje się jako połączenie powłoki metalicznej (cynk lub stop cynku i aluminium) z powłoką organiczną. Systemy te stosuje się zasadniczo z dwóch powodów: po pierwsze, w celu zwiększenia właściwości ochronnych cynkowania, zwłaszcza w szczególnie agresywnych środowiskach, gdzie odporność cynku jest znacznie zmniejszona z powodu wilgoci i obecności substancji zanieczyszczających. Połączenie powłoki cynkowej z powłoką organiczną daje efekt synergiczny (ochrona systemu duplex jest większa niż suma ochrony zapewnianej przez powłoki cynkowe i organiczne rozpatrywane osobno). W zależności od agresywności środowiska obliczono, że trwałość konstrukcji chronionej systemem dwuwarstwowym jest od 1,5 do 2,3 razy większa niż ochrona zapewniana przez sumę dwóch powłok rozpatrywanych osobno [30, 31]. Drugim powodem preferowania nakładania powłoki organicznej na powierzchnię ocynkowaną jest kolor produktu, gdy jest to konieczne ze względów estetycznych lub w przypadku zapotrzebowania na określone kolory (kolory bezpieczeństwa, sygnalizacyjne, kamuflażowe...).

Przygotowanie powierzchni. Jednym z najważniejszych i najbardziej problematycznych aspektów systemów dwuwarstwowych jest trudność w uzyskaniu odpowiedniej i trwałej przyczepności między powłoką organiczną a podłożem; dlatego konieczne jest staranne wstępne przygotowanie powierzchni przeznaczonej do pokrycia. Po cynkowaniu powłoka cynkowa ogniowa nie powinna zawierać:

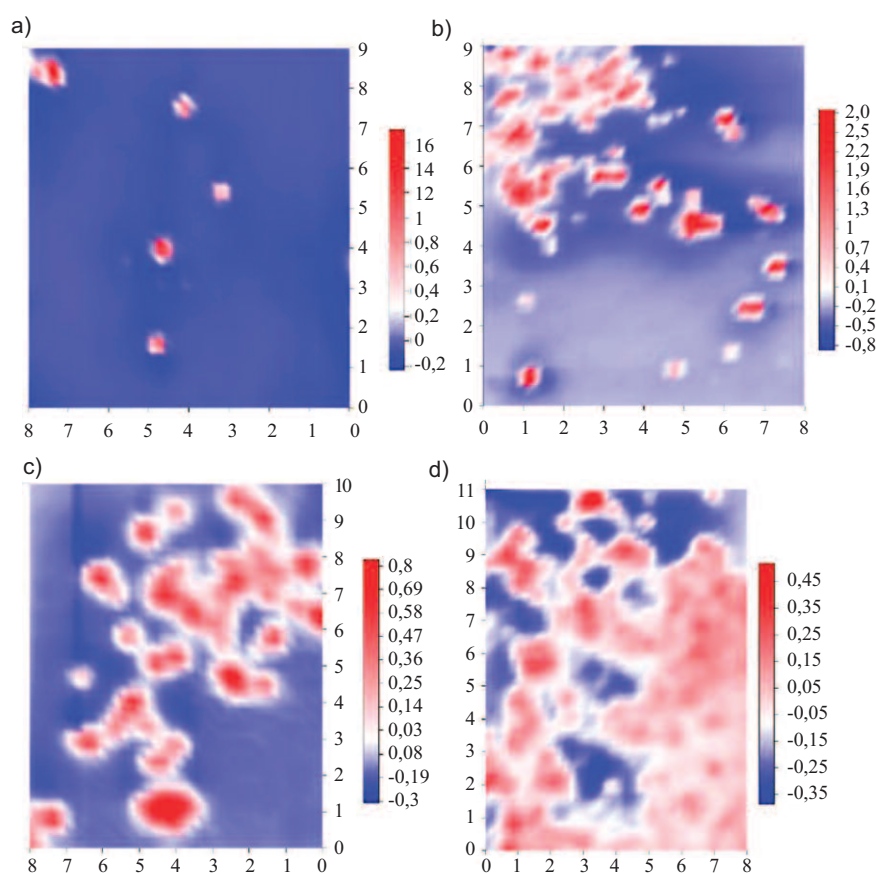
- cząstek żużla, popiołu cynkowego;
- kropelek i ostrych krawędzi;
- śladów topnika;
- kropli stopionego metalu i żużłu spawalniczego;
- oleju, brudu, kurzu i innych zanieczyszczeń;
- nadmierna biała rdza;
- resztki farby lub ślady po długopisie lub markerze;
- zardzewiałe lub uszkodzone obszary.

ducts react with carbon dioxide and moisture to form an insoluble film of hydrated zinc carbonate (3 to 12 months of outdoor exposure) but it always depends on atmospheric contaminations, HDG reactivity, humidity etc. One cannot visually recognize what type of zinc compounds are on the surface. A lot of them are unstable and partially soluble, therefore incompatible with an organic coating, below which they would cause osmosis phenomena.

Not every method of surface preparation is effective. In [32] was showed that the activity of the steel surface after various methods of mechanical preparation using the scanning vibrating electrode technique SVET method can be assessed [33]. The test results are shown in Figure 3 below. The best results were obtained after blasting the surface with a fine abrasive. The best mechanical treatment is light sweeping with abrasive. This method is included in the American Standard ASTM D 6386-10 [34] for liquid paints and ASTM D7803 [35] for powder paints (with an additional heating procedure before paint application). Mechanical surface preparation should be preceded by degreasing and washing. With this treatment, all corrosion products and contaminants of different nature are removed. Adequate sandblasting removes about ten micrometers of the zinc layer and provides the surface with a roughness that facilitates anchoring with the paint. An alternative and very effective method of ensuring proper adhesion and increasing the durability of the system is the use of appropriate conversion coatings [36, 37]. In both methods, care must be taken to comply with all technological parameters.

W środowisku neutralnym powierzchnia cynkowa reaguje z tlenem i wilgocią powietrza, tworząc różne wodorotlenki cynku. Produkty te reagują z dwutlenkiem węgla i wilgocią, tworząc nierozpuszczalną warstwę uwodnionego węglanu cynku (3 do 12 miesięcy ekspozycji na zewnątrz), ale zawsze zależy to od zanieczyszczeń atmosferycznych, reaktywności powłoki cynkowej ogniowej, wilgotności itp. Nie można wizualnie rozpoznać, jaki rodzaj związków cynku znajduje się na powierzchni. Wiele z nich jest niestabilnych i częściowo rozpuszczalnych, dlatego nie są kompatybilne z powłoką organiczną, pod którą mogłyby powodować zjawisko osmozy.

Nie każda metoda przygotowania powierzchni jest skuteczna. D. J. Mills i S. Jamali [32] wykazali, że aktywność powierzchni stali po różnych metodach przygotowania mechanicznego można ocenić za pomocą techniki skanującej elektrody wibracyjnej SVET [33]. Wyniki badań przedstawiono na rysunku 3 poniżej. Najlepsze wyniki uzyskano po obróbce powierzchni drobnym materiałem ściernym. Najlepszym sposobem obróbki mechanicznej jest lekkie szczotkowanie ściernicą. Metoda ta jest uwzględniona w amerykańskiej normie ASTM D 6386-10 [34] dla farb płynnych i ASTM D7803 [35] dla farb proszkowych (z dodatkową procedurą ogrzewania przed nałożeniem farby). Mechaniczne przygotowanie powierzchni powinno być poprzedzone odtłuszczeniem i myciem. Dzięki tej obróbce usuwane są wszystkie produkty korozji i zanieczyszczenia różnego rodzaju. Odpowiednie piaskowanie usuwa około dziesięciu mikrometrów warstwy cynku i nadaje powierzchni chropowatość, która ułatwia zakończenie farby. Alternatywną i bardzo skuteczną metodą zapewnienia odpowiedniej przyczepności i zwiększenia trwałości systemu jest zastosowanie odpowiednich powłok konwersyjnych [36, 37]. W obu metodach należy zwrócić uwagę na przestrzeganie wszystkich parametrów technologicznych.



Alternatywną i bardzo skuteczną metodą zapewnienia odpowiedniej przyczepności i zwiększenia trwałości systemu jest zastosowanie odpowiednich powłok konwersyjnych [36, 37]. W obu metodach należy zwrócić uwagę na przestrzeganie wszystkich parametrów technologicznych.

Fig. 3. The influence of the surface preparation method determined by the SVET method on its activity: a) active centers (red) on the galvanized surface – initial state; b) active centers on a galvanized surface prepared for painting with sandpaper; c) active centers on a galvanized surface prepared for painting with high-pressure water; d) active centers on the surface prepared for galvanizing by abrasive sweeping [32]

Rys. 3. Wpływ sposobu przygotowania powierzchni określony metodą SVET na jej aktywność: a) centra aktywne (czerwone) na powierzchni ocynkowanej – stan początkowy; b) centra aktywne na powierzchni ocynkowanej przygotowanej do malowania papierem ściernym; c) centra aktywne na powierzchni ocynkowanej przygotowanej do malowania wodą pod wysokim ciśnieniem; d) centra aktywne na powierzchni przygotowanej do cynkowania przez omiatanie ściernie [32]

The most common defects of Duplex systems – delamination. The effect of improper surface preparation is the delamination of organic coatings from the HDG coating (Photo 8a). The next cause of delamination of organic coatings and rapid corrosion of the undercoat HDG coating is a mechanical damage suffered by the system (e.g. during the installation of acoustic screens) and the flow of electrolytes in place. Another common cause of delamination are stresses introduced into the coatings during the assembly of the structure, for example when tightening screws (Photo 8b).

In summary, the main reasons for a service life limitation of a duplex systems are linked to the different surface defects before paint application and improper handling of the structure during assembly.

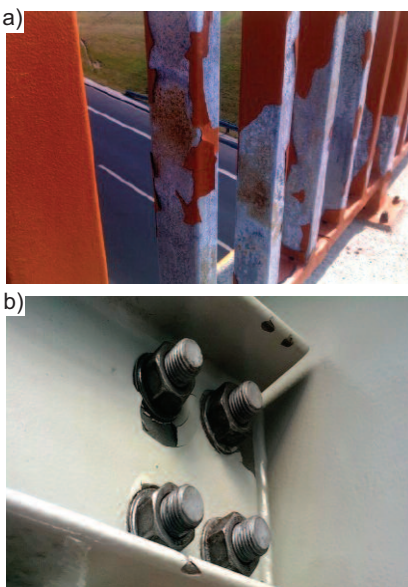


Photo 8. Delamination of organic coatings from the balustrade rails (a); coating delamination caused by introduced stresses (b)
Fot. 8. Odspojenie powłok organicznych od poręczy balustrady (a); odspojenie powłok spowodowane naprężeniami (b)

Summary and conclusions

Summarizing the authors' experience with the use of hot-dip galvanized coatings and duplex systems as corrosion protection in urban and road infrastructure, we would like to draw particular attention to the necessity of material and corrosion knowledge on the part of those who design and implement this type of protection. The main mistake is the belief that this type of protection will always result in homogeneous, glossy coatings with a zinc bloom that can be used as architectural coatings. Deviations from this appearance raise not only aesthetic concerns but also concerns about protective properties, which stems from a misunderstanding of the layered, alloy nature of these coatings.

The appearance and protective properties of these coatings are also rarely linked to the type of steel used for galvanizing and with the shape and thickness of the galvanized structural elements, which is the reason for further disappointment with the coating irregularities, their variable thickness, and poor mechanical properties. Certificates regarding steel composition are only occasionally received by galvanizing plants.

Another myth is the belief that a zinc coating will cover all surface imperfections and that prior steel preparation should be ignored. This leaves structures with residues from other surface treatments, holes and undercuts in welds, etc., which remain ungalvanized.

The environmental limitations of zinc coatings are poorly understood, particularly the problems of crevice corrosion and corrosion in areas of variable immersion. Both of these situations require regular monitoring of the protection. Crevice corrosion is particularly dangerous when metals that form corrosion links with zinc, such as lead, are added to the galvanizing bath. Problems related to galvanic corrosion

Najczęstsze wady systemów duplex – rozwarstwianie. Skutkiem niewłaściwego przygotowania powierzchni jest rozwarstwianie się powłok organicznych od powłok cynkowanych ogniowo (fotografia 8a). Kolejną przyczyną odwarstwiania się powłok organicznych i szybkiej korozji powłoki podkładowej HGD jest uszkodzenie mechaniczne systemu (np. podczas montażu ekranów akustycznych) oraz przepływ elektrolitów w miejscu montażu. Inną częstą przyczyną odwarstwiania się powłok są naprężenia wprowadzane do powłok podczas montażu konstrukcji, na przykład podczas dokręcania śrub (fotografia 8b).

Podsumowując, główne przyczyny ograniczenia trwałości systemów dwuwarstwowych są związane z różnymi wadami powierzchni przed nałożeniem farby oraz niewłaściwym obchodzeniem się z konstrukcją podczas montażu.

Podsumowanie i wnioski

Powłoki cynkowe ogniowe i systemy duplex są stosowane od kilkudziesięciu lat i są uważane za najlepsze rozwiązanie w zakresie ochrony antykorozyjnej w warunkach atmosferycznych i w słodkiej wodzie. W przypadku stosowania powłok duplex istnieje również przekonanie, że ich działanie ochronne będzie nawet większe niż działanie ochronne samych powłok – czy to powłoki cynkowej ogniowej czy powłok organicznych. Podsumowując doświadczenia autorów z zastosowaniem powłok cynkowych zanurzeniowych i systemów duplex jako zabezpieczeń antykorozyjnych w infrastrukturze miejskiej i drogowej, szczególną uwagę chcemy zwrócić na niezbędność wiedzy materiałowej i korozyjnej osób projektujących i wykonujących tego typu zabezpieczenia. Głównym błędem jest przesądzenie, że tego typu zabezpieczenia dadzą zawsze jednolite, błyszczące powłoki z kwiatem cynkowniczym, które można zastosować jako powłoki architektoniczne. Odstępstwa od takiego wyglądu budzą nie tylko wątpliwości estetyczne, ale również dotyczące właściwości ochronnych, co wynika z niezrozumienia warstwowego, stopowego charakteru tych powłok.

Rzadko wiąże się również wygląd i właściwości ochronne tych powłok z rodzajem stali, którą zastosowano do cynkowania oraz z kształtem i grubością elementów cynkowanych konstrukcji, co jest powodem dalszych rozczarowań nierównością powłok, ich zmienną grubością, złymi właściwościami mechanicznymi. Atesty dotyczące składu stali jedynie okazjonalnie trafiają do ocynkowni.

Następnym mitem jest wiara w to, że powłoka cynkowa przykryje wszystkie niedoskonałości powierzchni i nie należy zwracać uwagi na jej przygotowanie. Stąd na konstrukcjach są pozostawiane pozostałości z innych procesów obróbki powierzchni, otwory i podcięcia w spoinach itd., które pozostają nieocynkowane. Bardzo słabo znane są ograniczenia środowiskowe

of improperly applied galvanized elements with metals forming corrosion cells with them are very common. Disseminating the definition of a corrosion link seems to us to be one of the main goals of courses and articles on corrosion protection.

Duplex systems, even more so than HDG coatings alone, are considered a panacea for all corrosion problems, without considering the need for very good preparation of the galvanised surface before applying paint coatings and selecting the thickness of the paint coatings so that it is sufficient for independent corrosion protection in a given environment. If the paint coatings are too thin, there will be a problem of rapid electrolyte penetration, partial delamination of the paint coatings and rapid corrosion of the zinc coating in the gap between the zinc coating and the paint coating, which has become detached but remains on the element.

HDG coatings and Duplex systems have been used for several decades and are considered to be the best solution for anti-corrosion protection in atmospheric conditions and in fresh water. When using Duplex coatings, there is also a belief that their protection effect will be even higher than the total protection effects of the HDG coating and the organic coatings applied on it. These views very often make people stop paying attention to the limitations of these protective solutions and the precautions needed for a correct service. Properly used HDG coatings and Duplex systems provide sacrificial and barrier protection, inhibit corrosion processes and capture aggressive ions that penetrate through the coatings. When using HDG coatings, proper production procedures must be followed:

- selection of steel suitable for galvanizing;
- proper preparation of the steel surface before galvanizing;
- the shape of the elements suitable for galvanizing;
- the appropriate composition of the bath for the intended service environment;
- HDG coatings quality protecting particularly corrosion-sensitive areas, such as edges.

The following items should be taken care of:

- temperature limits imposed by the zinc coating;
- the limitations related to the pH value of the environment;
- the risks related to the formation of corrosion cells in specific environments, whether inside the zinc coating with certain additives (which were in the galvanizing bath), or by combining with elements with significantly different chemical potential.

As for Duplex system it is particularly important surface preparation before the application of the organic coatings, using fine abrasive sweeping or using conversion coatings. It is crucial to avoid or quickly repair, mechanical damage that accelerates undercoating corrosion of the HDG coating.

HDG and Duplex coatings are considered to be widely known solutions that do not require attention and research, which is definitely not true in many cases.

Only detailed scientific work, the dissemination of their results and creative criticism of standards will allow the pro-

zastosowania powłok cynkowych, a w szczególności problemy korozji szczelinowej tych powłok oraz korozja w miejscach zmiennego zanurzenia. Obie te sytuacje wymagają regularnej kontroli stanu zabezpieczeń. Korozja szczelinowa jest szczególnie niebezpieczna, gdy do kąpeli cynkowniczej dodawane są metale tworzące ogniwa korozyjne z cynkiem, jak np. ołów.

Problemy związane z korozją galwaniczną niewłaściwie zastosowanych elementów ocynkowanych z metalami tworzącymi z nimi ogniwa korozyjne są bardzo częste. Upowszechnienie definicji ogniwa korozyjnego wydaje nam się jednym z głównych celów kursów i artykułów z zakresu ochrony korozyjnej.

Systemy duplex, jeszcze bardziej niż samodzielne powłoki cynkowe zanurzeniowe uważa się za panaceum na wszystkie problemy korozyjne, nie biorąc pod uwagę konieczności bardzo dobrego przygotowania powierzchni powłoki cynkowej przed aplikacją powłok malarskich i doboru grubości powłok malarskich tak, aby była ona wystarczająca do samodzielnego zabezpieczenia antykorozyjnego w danym środowisku. W przypadku za cienkich powłok malarskich zaistnieje problem szybkiej penetracji elektrolitu, częściowej delaminacji powłok malarskich i szybkiej korozji powłoki cynkowej w szczelinie pomiędzy powłoką cynkową i odspojoną, ale pozostającą jeszcze na elemencie, powłoką malarską. Poglądy te bardzo często sprawiają, że ludzie przestają zwracać uwagę na ograniczenia tych rozwiązań ochronnych i środki ostrożności niezbędne do prawidłowej eksploatacji. Prawidłowo stosowane powłoki cynkowe ogniowe i systemy duplex zapewniają ochronę protektorową i barierową, hamując procesy korozji i wychwytyując agresywne jony, które przenikają przez powłoki. W przypadku stosowania powłok cynkowych ogniowych należy przestrzegać odpowiednich procedur produkcyjnych:

- wybór stali odpowiedniej do cynkowania;
 - właściwe przygotowanie powierzchni stali przed cynkowaniem;
 - kształt elementów odpowiedni do cynkowania;
 - odpowiedni skład kąpeli dla przewidywanego środowiska eksploatacji;
 - jakość powłok cynkowych ogniowych chroniących obszary szczególnie wrażliwe na korozję, takie jak krawędzie.
- Należy zwrócić uwagę na następujące kwestie:
- ograniczenia temperaturowe wynikające z powłoki cynkowej;
 - ograniczenia związane z wartością pH środowiska;
 - ryzyko związane z tworzeniem się ogniw korozyjnych w określonych środowiskach, zarówno wewnątrz powłoki cynkowej z pewnymi dodatkami (które znajdowały się w kąpeli cynkowej), jak i w wyniku połączenia z elementami o znacznym różnym potencjale chemicznym.

W przypadku systemu duplex szczególnie ważne jest przygotowanie powierzchni przed nałożeniem powłok organicznych, przy użyciu drobnego ścierniwa lub powłok konwersyjnych. Bardzo ważne jest unikanie lub szybkie naprawianie uszkodzeń mechanicznych.

Powłoki cynkowe ogniowe i duplex są powszechnie uznawane za rozwiązania, które nie wymagają uwagi i badań, co w wielu przypadkach zdecydowanie nie jest prawdą.

per use of these great anti-corrosion solutions, as in the case of edge protection or local corrosion on the inclusions of such additives as lead or bismuth in certain corrosive environments.

Received: 03.07.2025
Revised: 02.09.2025
Published: 23.10.2025

Literature

- [1] Saeedikhani M, Wijesinghe SL, Blackwood DJ. Barrier and Sacrificial Protection Mechanisms of Zinc Rich Primers. *Engineering Journal*. 2019, 23, 224-233.
- [2] Hussain AK, Seetharamaiah N, Pichumani M, Shilpa Chakra Ch. Research Progress in Organic Zinc Rich Primer Coatings for Cathodic Protection of Metals – A Comprehensive Review. *Progress in Organic Coatings*. 2021, 153, 106040.
- [3] Kalendová A, Kalenda P, Veselý D. Comparison of the efficiency of inorganic nonmetal pigments with zinc powder in anticorrosion paints. *Progress in Organic Coatings*. 2006, 57, 1-10.
- [4] Park JH, Yun TH, Kim KY, Song YK, Park JM. The improvement of anticorrosion properties of zinc-rich organic coating by incorporating surface-modified zinc particle. *Progress in Organic Coatings*. 2012, 74 (1), 25-35.
- [5] Meroufel A, Touzain S. EIS characterisation of new zinc-rich powder coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2007, 59 (3), 197-205.
- [6] Ma Q, Wang L, Sun W, Yang Z, Wang S, Liu G. Effect of chemical conversion induced by self-corrosion of zinc powders on enhancing corrosion protection performance of zinc-rich coatings. *Corrosion Science*. 2022, 194, 109942.
- [7] Saeedikhani M, Wijesinghe S, Blackwood DJ. Revisiting Corrosion Protection Mechanisms of a Steel Surface by Damaged Zinc-Rich Paints. *Corrosion*. 2019, 75 (7), 756-770.
- [8] Knudsen OØ, Skilbred AWB, Løken A, Daneshian B, Hoche D. Correlations between standard accelerated tests for protective organic coatings and field performance. *Materials Today Communication*. 2022, 31, 103729.
- [9] Ogle K, Morel S, Jacquet D. Observation of self-healing functions on the cut edge of galvanized steel using SVET and pH microscopy. *Journal of the Electrochemical Society*. 2006, 153 (1), B1-B5.
- [10] Dolgikh O, Simillion H, Lamaka SV, Bastos AC, Xue HB, Taryba MG, Oliveira AR, Allély C, Van Den Bossche B, Van Den Bergh K, De Strycker J. Corrosion protection of steel cut-edges by hot-dip galvanized Al (Zn, Mg) coatings in 1 wt% NaCl: Part I. Experimental study. *Materials and Corrosion*. 2019, 70 (5), 768-779.
- [11] Dolgikh O, Simillion H, Lamaka SV, Bastos AC, Xue HB, Taryba MG, Oliveira AR, Allély C, Van Den Bossche B, Van Den Bergh K, De Strycker J. Corrosion protection of steel cut-edges by hot-dip galvanized Al (Zn, Mg) coatings in 1 wt% NaCl: Part II. Numerical simulations. *Materials and Corrosion*. 2019, 70 (5), 780-792.
- [12] Boshkov N, Petrov K, Kovacheva D, Vitkova S, Nemska S. Influence of the alloying component on the protective ability of some zinc galvanic coatings. *Electrochimica Acta*. 2005, 51 (1), 77-84.
- [13] Kania H, Mendala J, Kozuba J, Sternus M. Development of Bath Chemical Composition for Batch Hot-Dip Galvanizing – A Review. *Materials*. 2020, 13 (18), 4168.
- [14] Arguillarena A, Margallo M, Uriaga A. Carbon footprint of the hot-dip galvanisation process using a 5 life cycle assessment approach. *Cleaner Engineering and Technology*. 2021, 2, 100041.
- [15] Charters FJ, O'Sullivan AD, Cochrane T. A. Influences of zinc loads in urban catchment runoff: Roof type, land use type, climate and management strategies. *Journal of Environmental Management*. 2022, 322, 116076.
- [16] Baran J. Ślad węglowy organizacji i produktu w branży galwanotechnicznej. *Biuletyn Galwanotechnika*. 2023, 42 (57), 5-10.
- [17] Highway Design Manual CALTRANS 2019 California Department of Transportation.
- [18] Pingera T, Brandta M, Grothe S, Marginean G. Abrasive Wear Behavior of Batch Hot-Dip Galvanized Coatings. *Materials*. 2024, 17, 1547.
- [19] Sepper S, Peetsalu P, Kulu P, Saarna M. The role of silicon in the hot dip galvanizing process. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences*. 2016, 65,2, 159-165.
- [20] Pokorný P, Kolisko J, Balik L, Novak P. Effect of chemical composition of steel on the structure of hot-dip galvanized coating. *Metallurgija*. 2016, 55 (1), 115-118.
- [21] <http://www.gavanizeit.org/>
- [22] Yu Z, Hu J, Meng H. A Review of Recent Developments in Coating Systems for Hot-Dip Galvanized Steel. *Frontiers in Materials*. 2020, 7: 74.
- [23] Królikowska A, Komorowski L, Bonora PL. Pitting Corrosion of Hot-Dip Galvanized Coatings. *Materials*. 2020, 13 (9), 2031.
- [24] Królikowska A., Komorowski L. Wpływ dodatków stopowych bizmutu i ołowiu na odporność korozyjną powłok cynkowych zanurzeniowych – Morfologia powłok. *Ochrona przed Korozją*. 2015, 10, 350-357.
- [25] ISO 12944-2:2017 Paints and varnishes – Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 2: Classification of environments
- [26] Królikowska A, Komorowski L. Ocena przyczyn uszkodzeń powłok antykorozyjnych na słupach odgromowych stacji 400 kV, *Ochrona przed Korozją*. 2023, 66, 237-242.
- [27] Maass P, Peissker P. *Handbook of Hot-dip Galvanization*, Wiley-VCH: Weinheim, Germany. 2011.
- [28] Schulz WD, Thiele M. *General hot-dip galvanizing*, Eugen G. Leuze Verlag KG, Bad Saulgau. Germany, 2012.
- [29] Bonora PL, Królikowska A. Lack of Basic Corrosion Control Results in Catastrophes. *Materials Performance*. 2015, 54 (11), 52-54.
- [30] Gagné M, Øystein Knudsen O. Duplex Zinc Coatings for Steel Bridges. *Materials Performance* 2021, <https://www.materialsperformance.com/articles/coating-linings/2021/11/duplex-zinc-coatings-for-steel-bridges>.
- [31] Lozrt J, Votava J, Šmak R. Duplex anti-corrosion protection of steel using a combination of hot-dip galvanising and water-soluble paints. *Acta Technologica Agriculturae*. 2021, 24, 129-135.
- [32] Mills DJ, Jamali S. Effect of different surface preparations prior to painting on the corrosion behavior and surface activity of mild steel. *Proceedings of EUROCORR 2010, Moscow*.
- [33] Bastos AC, Quevedo MC, Karavai OV, Ferreira MGS. Review – On the Application of the Scanning Vibrating Electrode Technique (SVET) to Corrosion Research. *Journal of The Electrochemical Society*. 2017, 164 (14), C973-C990.
- [34] ASTM D6386-22 Standard Practice for Preparation of Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coated Iron and Steel Product and Hardware Surfaces for Painting.
- [35] ASTM D7803-19 Standard Practice for Preparation of Zinc (Hot-Dip Galvanized) Coated Iron and Steel Product and Hardware Surfaces for Powder Coating.
- [36] Lovchinov K, Gergova R, Alexieva G. Structural, Morphological and Optical Properties of Nanostructured ZrO₂ Films Obtained by an Electrochemical Process at Different Deposition Temperature. *Coatings*. 2022, 12 (7), 972.
- [37] Stambolova I, Dimitrov O, Vassilev S, Yordanov S, Blaskov V, Boshkov N, Shipchka M. Preparation of newly developed 578 CeO₂/ZrO₂ multilayers: effect of the treatment temperature on the structure and corrosion performance of stainless steel. *Journal of Alloys and Compounds*. 2019, 806, 1357-136.

Artykuł wpłynął do redakcji: 03.07.2025 r.
Otrzymano poprawiony po recenzjach: 02.09.2025 r.
Opublikowano: 23.10.2025 r.