

**AGNIESZKA KRÓLIKOWSKA**

ORCID: 0000-0002-0378-0386

**IZABELA KUNCE**

ORCID: 0000-0002-1578-4771

Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa

DOI: 10.15199/40.2023.10.1

# Overview of corrosion problems of tower structures and proposals for their solution

## Przegląd problemów korozyjnych dotyczących obiektów wieżowych i propozycje rozwiązań

*Tower structures very often have a lattice design, which creates many problems in the proper application and maintenance of anti-corrosion coatings. Solutions to this problem include selection of corrosion resistant materials for the structure and appropriate methods of joining the elements of the structure, achieving the highest possible degree of surface preparation, careful application of coatings and their seasoning, proper protection of areas where the structure is anchored to the ground, applying additional methods of protection such as sacrificial protection. Problems with the durability of tower structures and suggestions for their improvement are presented based on the authors' own research and literature reports.*

*Keywords: tower structures, durability of corrosion protection, coating defects, corrosion, galvanisation, duplex system, paint coating*

### 1. Introduction

Tower structures are used in many branches of urban and industrial infrastructure. In repetitive versions, they serve as support for medium- and high-voltage lines in the power industry and telecommunications. Lattice tower structures are used in industrial cranes, support structures in industry, but also as components of amusement park facilities and observation towers, to name a few. Many of tower structure applications are essential for both the security of the country and the comfort of the public, which is why it is vital for this type of structure to be highly durable.

Tower structures are usually built from unalloyed or low-alloy structural steels; the structural components are bolted or welded

*Obiekty wieżowe bardzo często mają konstrukcję kratową, co stwarza wiele problemów w zakresie prawidłowego wykonania i utrzymania powłokowych zabezpieczeń antykorozyjnych. Rozwiązaniami są: wybranie trwałego korozyjnie materiału konstrukcji oraz odpowiednich metod łączenia jej elementów, dążenie do jak najwyższego stopnia przygotowania powierzchni, staranne nanoszenie powłok i ich sezonowanie, prawidłowe zabezpieczanie miejsc osadzenia konstrukcji w gruncie, poszukiwanie dodatkowych metod ochrony, takich jak np. ochrona protektorowa. Problemy dotyczące trwałości obiektów wieżowych i propozycje jej podwyższenia przedstawiono na podstawie przeprowadzonych badań i studiów literatury przedmiotu.*

*Słowa kluczowe: konstrukcje wieżowe, trwałość zabezpieczeń antykorozyjnych, wady powłok, korozja, cynkowanie, system duplex, powłoka malarska*

### 1. Wstęp

Konstrukcje wieżowe są wykorzystywane w wielu gałęziach infrastruktury miejskiej i przemysłowej. W wersjach powtarzalnych są konstrukcjami wsporczymi linii średniego i wysokiego napięcia w energetyce oraz w telekomunikacji. Kratowe konstrukcje wieżowe są stosowane w żurawiach przemysłowych, konstrukcjach wsporczych w przemyśle, ale również m.in. jako element obiektów w wesołych miasteczkach i wieże obserwacyjne. Wiele z zastosowań konstrukcji wieżowych ma podstawowe znaczenie zarówno dla bezpieczeństwa kraju, jak i komfortu społeczeństwa, dlatego wysoka trwałość tego typu konstrukcji jest bardzo istotna.

**Agnieszka Królikowska, BEng, PhD** – a specialist in corrosion and corrosion protection with many years of laboratory and practical experience. Creator of anticorrosion courses on the protection of steel and concrete surfaces conducted by the Road and Bridge Research Institute. Lecturer at universities and vocational courses. Active member of national and international organizations.

**Dr. inż. Agnieszka Królikowska** – specjalista w dziedzinie korozji i antykorozyj z wieloletnim doświadczeniem laboratoryjnym i praktycznym. Twórcza prowadzonych przez Instytut Badawczy Dróg i Mostów kursów antykorozyjnych dotyczących zabezpieczeń powierzchni stalowych i betonowych. Wykładowca na uczelniach i kursach zawodowych. Aktywny członek organizacji krajowych i międzynarodowych.

E-mail: akrolikowska@ibdim.edu.pl

**Izabela Kunce, BEng, Msc**, is a graduate of the Materials Engineering Institute at the Faculty of New Technologies and Chemistry of the Military University of Technology in Warsaw. Since 2019, she has worked for the Road and Bridge Research Institute at the Laboratory of Corrosion Protection. She is Deputy President of the Powder Coatings Committee of the Polish Corrosion Association.

**Mgr inż. Izabela Kunce** jest absolwentką inżynierii materiałowej na Wydziale Nowych Technologii i Chemii Wojskowej Akademii Technicznej w Warszawie. Od 2019 roku pracuje w Instytucie Badawczym Dróg i Mostów w Pracowni Zabezpieczeń Antykorozyjnych. Zastępczyni Przewodniczącej Komisji ds. Farb Proszkowych Polskiego Stowarzyszenia Korozyjnego.

E-mail: ikunce@ibdim.edu.pl

■ Otrzymano / Received: 29.08.2023. Przyjęto / Accepted: 4.10.2023



Photo 1. Power line located in a wetland with humus soils and high moisture content

Fot. 1. Linia energetyczna zlokalizowana na podmokłych terenach z glebami humusowymi i wysoką wilgotnością



Photo 2. Corrosion of galvanized tower structure components after 10 years of service

Fot. 2. Korozja ocynkowanych elementów konstrukcji wieżowej po 10 latach eksploatacji

together. In most cases, the structural steel components of towers are additionally galvanised (hot dip or cold galvanised) [1, 2]. Steel or galvanised components are also protected with anti-corrosive coatings. Weathering steels are used to construct tower structures as well.

Tower structures are operated under atmospheric conditions. Depending on their location, they are exposed to various environmental factors, such as erosion and corrosion processes caused by soil and air pollutants, solar radiation, humidity, an atmosphere rich in chloride ions, e.g. in coastal areas [3] or caused by an industrial atmosphere [4]. An example of towers located in a highly corrosive area is shown in Photo 1.

Due to the economic and social costs of corrosion effects and for safety considerations, the durability of tower structures is very important. The main corrosion hazards relating to this type of structure include:

- many edges, gaps, and joints relative to the total surface area,
- stress associated with movements of the structure,
- frequent exposure to mechanical damage in areas up to the height of human and animal reach,
- chemical exposures (plant protection agents, bird droppings),
- erosion from wind-borne dust,
- infrequent maintenance due to difficult access and cost of power line outages,
- constant exposure to UV radiation, precipitation, condensation, frost impact.

The article discusses corrosion issues and protection considerations for steel tower structures relating to the structural components themselves, and to the connections between the components and with the foundation. Protection of transmission line conductors and insulators, mainly with modern hydrophobic coatings, is discussed in other articles on these issues [5].

## 2. Methods of protecting and repairing tower structures

The protective coatings used and listed in the literature mainly include hot-dip galvanised coatings, electroplated and chemically plated coatings, thermal sprayed and cold sprayed metallic coatings, diffusion coatings and non-metallic coatings [3]. Depending on the type of corrosive environment, systems with acrylic, epoxy and fluorine or moisture-cured polyurethane coatings are also used, as well as polyvinyl coatings, which have proven to be reliable for many years [6, 7]. Zinc coatings with a zinc content of more than 92% in the dry film, known as cold galvanised coatings [8, 9],

Konstrukcje wieżowe są budowane najczęściej z niestopowych lub niskostopowych stali konstrukcyjnych; elementy konstrukcyjne są łączone śrubami bądź spawane. W większości przypadków stalowe elementy konstrukcyjne wież są dodatkowo cynkowane (zanurzeniowo lub na zimno) [1, 2]. Stalowe lub ocynkowane elementy zabezpiecza się również antykorozyjnymi powłokami malarskimi. Na konstrukcje wieżowe stosuje się także stale trudno rdzewiejące.

Konstrukcje wieżowe eksploatowane są w warunkach atmosferycznych. W zależności od usytuowania narażone są na różne oddziaływania środowiska, takie jak procesy erozyjne i korozyjne – spowodowane zanieczyszczeniami gleby i powietrza, promieniowaniem słonecznym, wilgocią, atmosferą bogatą w jony chlorkowe, np. w strefach przybrzeżnych [3], atmosferą przemysłową [4]. Przykład zlokalizowania słupów w miejscu o silnym oddziaływaniu korozyjnym przedstawiono na fot. 1.

Ze względu na koszty ekonomiczne i społeczne skutków korozji oraz bezpieczeństwo bardzo ważna jest trwałość konstrukcji wieżowych. Główne zagrożenia korozyjne dotyczące tego typu konstrukcji to:

- bardzo duża, w stosunku do całej powierzchni, liczba krawędzi, szczelin i połączeń,
- naprężenia związane z ruchami konstrukcji,
- częste narażenia na zniszczenia mechaniczne w obszarach do wysokości zasięgu ludzi i zwierząt,
- narażenia chemiczne (środki ochrony roślin, ptasie odchody),
- erozja związana z oddziaływaniem pyłów przenoszonych przez wiatr,
- rzadkie przeprowadzanie przeglądów i remontów ze względu na trudny dostęp i koszty wyłączeń linii energetycznych,
- stała ekspozycja na promieniowanie UV, opady, kondensacja wilgoci, oddziaływanie mrozu.

W artykule omówiono problemy korozyjne i kwestie dotyczące zabezpieczeń stalowych konstrukcji wież, zarówno na elementach konstrukcyjnych, jak również na łączeniach elementów i na łączeniach z posadowieniem. Zabezpieczenia przewodników i izolatorów linii przesyłowych, głównie nowoczesnymi powłokami hydrofobowymi, są omówione w innych artykułach dotyczących tych zagadnień [5].

## 2. Metody zabezpieczania i napraw konstrukcji wieżowych

Stosowane powłoki ochronne, wymieniane w literaturze przedmiotu, to głównie: zanurzeniowe powłoki cynkowe, powłoki galwaniczne i powłoki nakładane metodą chemiczną z kąpieli

also in the new version – with additives of various nanoparticles, improving their adhesion to the substrate [10], are often mentioned as a corrosion protection solution for tower structures. Such protection with a thickness of 80 µm is capable of providing durable protection for 25–30 years (however, it was not stated in which corrosive environment) [11].

In Poland, the authors have only encountered hot-dip galvanised zinc coatings as the sole means of corrosion protection. However, due to the low durability of zinc coatings alone in some corrosive environments (Photo 2), this solution is being replaced by duplex systems or organic coatings only.

### 3. Requirements for corrosion protection of tower structures contained in selected normative and national documents

General requirements for the design of steel structures such as towers and masts are dealt with in Eurocode 3 [12]. Regarding the durability of structures, this standard refers to documents directly related to various methods of corrosion protection: hot-dip galvanising, spray metallization and paint coatings [13–15].

In Poland, due to the country's extensive infrastructure, tower structure maintenance and construction is mainly regulated by the Technical Requirements of PSE S.A. for the corrosion protection of steel and galvanised steel structures [16]. New structures usually utilise galvanised steel components that are later protected by coating systems. Renovation systems are also listed among the solutions for the protection of galvanised and non-galvanised steel structures. Systems which have a national (or European) technical assessment and have passed the accelerated tests required by the PSE can be used as paint coating systems; these include acrylic, polyvinyl, epoxy-polyurethane, while alkyds can be used as renovation systems. The required thicknesses of the paint coating systems depend on the corrosive environment, the type of substrate, the type of system and the type of application (primary or renovation) and range from 120 µm in a C3 environment to 200–240 µm in a C5 environment. The document also provides detailed technological and acceptance requirements for anti-corrosion systems. These do not include protection of the foundation nor the connection of the structure to the foundation.

In contrast, the specification for corrosion protection of steel lattice structures of transmission lines in Oman [17] also details foundation protection: an anti-corrosion coating is required for the stubs of the towers, the steel pile casing, and the pile caps. The stubs are to be coated with two coats of epoxy paint up to 300 mm above the level of concrete. After cementing the foundation caps, the joint with the stub should be sealed with an acrylic-type sealing compound to a thickness of 10 cm around the stub. The pile cap should be coated with tar paint at 150 mm above concrete level and 300 mm below ground level.

Before erecting the structure, the steel components should be stored on wooden supports of sufficient height to avoid contact with the ground. No white rust is allowed on components before painting. If there is minor damage to the zinc coating on steel structural components, they should be cleaned and repaired with two coats of zinc paint containing at least 95% zinc in the dry film. The final dry film thickness should be at least 150 µm. Larger damage or systematic defects in the zinc coating can only be repaired by hot-dip galvanising.

Steel components of the truss structure should be protected with a corrosion protection system consisting of:

- a high zinc primer with a minimum thickness of 40 µm,
- an interlayer epoxy coating with iron oxide flake filler, with a minimum thickness of 60 µm,

(*chemically plated coating*), powłoki metalowe natryskiwane ciepłonie i nakładane na zimno, powłoki dyfuzyjne i powłoki niemetaliczne [3]. W zależności od rodzaju środowiska korozyjnego stosowane są również systemy z powłokami akrylowymi, epoksydowymi i fluorowymi lub poliuretanowymi utwardzanymi wilgocią oraz, sprawdzające się od lat, powłoki poliwinylowe [6, 7]. Jako zabezpieczenie antykorozyjne konstrukcji wieżowych często wymieniane są powłoki cynkowe o zawartości powyżej 92% cynku w suchej powłoce, nazywane cynkowaniem na zimno [8, 9], również w nowej wersji – z dodatkami różnych nanocząstek, poprawiającymi ich przyczepność do podłoża [10]. Zabezpieczenie tego typu o grubości 80 µm może zapewnić trwałość ochrony przez 25–30 lat (nie podano jednak, w jakim środowisku korozyjnym) [11].

Na terenie Polski autorki spotkały się jedynie ze stosowaniem zanurzeniowych powłok cynkowych jako samodzielnego zabezpieczenia antykorozyjnego. Z uwagi jednak na niską trwałość samodzielną powłok cynkowych w niektórych środowiskach korozyjnych (fot. 2) rozwiązanie to jest zastępowane systemami duplex lub wyłącznie powłokami organicznymi.

### 3. Wymagania dotyczące zabezpieczeń antykorozyjnych konstrukcji wieżowych zawarte w wybranych dokumentach normatywnych i krajowych

Wymagania ogólne odnośnie do projektowania konstrukcji stalowych takich jak wieże i maszty są przedmiotem Eurokodu 3 [12]. W zakresie trwałości konstrukcji norma ta odwołuje się do dokumentów związanych bezpośrednio z różnymi metodami ochrony przed korozją: cynkowania zanurzeniowego, metalizacji natryskowej oraz powłok malarskich [13–15].

W Polsce, z uwagi na rozbudowaną infrastrukturę, w wypadku zabezpieczania konstrukcji wieżowych najczęściej stosowane są Wymagania techniczne PSE S.A. dotyczące zabezpieczeń antykorozyjnych konstrukcji stalowych i stalowych ocynkowanych [16]. W nowych konstrukcjach wykorzystuje się najczęściej ocynkowane elementy stalowe, zabezpieczane później systemami malarskimi. Systemy renowacyjne również są wymieniane wśród zabezpieczeń ocynkowanych i nieocynkowanych konstrukcji stalowych. Jako systemów malarskich można używać systemów, które posiadają krajową (bądź europejską) ocenę techniczną i pozytywnie przeszły badania przyspieszone wymagane przez PSE; są to m.in.: systemy akrylowe, poliwinylowe, epoksydowo-poliuretanowe, a jako renowacyjne – również alkidowe. Wymagane grubości systemów malarskich zależą od środowiska korozyjnego, typu podłoża, rodzaju systemu oraz rodzaju wymalowania (pierwotnego lub renowacyjnego) i wynoszą od 120 µm w środowisku C3 do 200–240 µm w środowisku C5. W dokumencie podano również szczegółowe wymagania technologiczne i odbiorowe systemów antykorozyjnych. Nie obejmują one ochrony posadowienia i łączenia konstrukcji z posadowieniem.

W specyfikacji zabezpieczeń antykorozyjnych stalowych konstrukcji kratowych linii przesyłowych w Omanie [17] wyszczególniono natomiast również ochronę posadowienia: wymagane jest naniesienie antykorozyjnej powłoki malarskiej na króćce wież, stalową obudowę pali i oczepy. Króćce należy pokryć dwiema warstwami farby epoksydowej do wysokości 300 mm nad poziomem betonu. Po zabetonowaniu czap fundamentowych styk z króćcem należy uszczelnić masą uszczelniającą typu akrylowego na grubości 10 cm wokół króćca. Oczep fundamentowy należy pomalować farbą smołową na wysokości 150 mm nad poziomem betonu i 300 mm pod poziomem gruntu.

Przed montażem konstrukcji elementy stalowe powinny być składowane na drewnianych wspornikach o wystarczającej wysokości, aby uniknąć kontaktu z gruntem. Nie dopuszcza się białej rdzy na elementach przed malowaniem. W przypadku wystąpie-

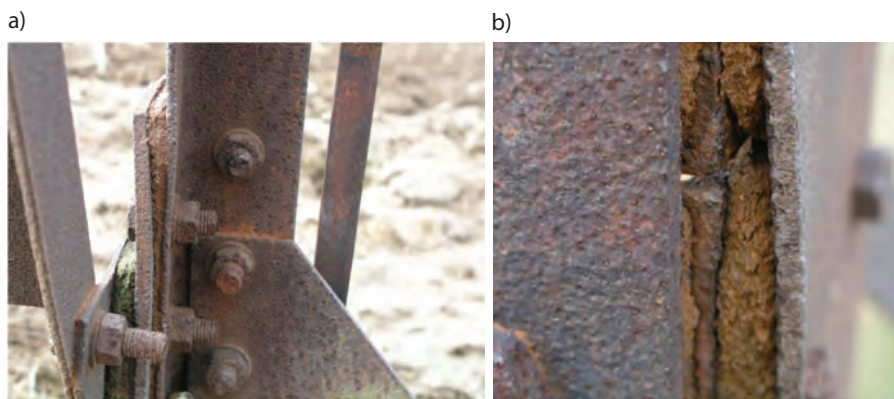


Photo 3. Crevice corrosion of weathering steel between a tower structure component and a gusset plate: a) general view, b) enlargement of the contact area (photo: Jacek Bordziłowski)

Fot. 3. Korozja szczelinowa stali trudno rdzewiejącej pomiędzy elementem konstrukcji wieżowej i blachą węzłową: a) widok ogólny, b) powiększenie obszaru styku (fot. Jacek Bordziłowski)

- a polyurethane or acrylic-epoxy topcoat with a minimum thickness of 60  $\mu\text{m}$ .

The complete coating system is guaranteed for a period of not less than 5 years from the date of final acceptance.

An interesting solution for pole structures is provided in a 2022 document [18] issued by the Ministry of Power in India. The technical specification for transmission line construction recommends the use of pile-shaped poles due to the fact that these types of towers occupy a smaller area, have greater strength in extreme weather conditions (lower bending moment at the base) and better aesthetics. A zinc immersion coating applied to the structure after all edges have been rounded is required as corrosion protection. The minimum amount of zinc coating in  $\text{g}/\text{m}^2$  and the average coating thickness in  $\mu\text{m}$  for components up to 5 mm thick should be 460/65, while for components over 5 mm thick: 610/87. For structures up to 20 km from the sea, these quantities should equal 610/87 and 900/127 respectively. The second anti-corrosion technology mentioned in the recommendations described is thermal sprayed zinc coatings. However, no requirements are given for these coatings.

#### 4. Solutions proposed in the literature

Most of the current literature on the corrosion durability of tower structures (mainly transmission towers) comes from China, where the power grid is developing rapidly [2–4, 19, 20].

In many countries, predominantly galvanised steel tower structures are built and then protected with anti-corrosion paint coatings (this is also the preferred solution in Poland), but in China this is considered to consume too much energy and to be a threat to the environment and human health [18]. Therefore, the use of weathering steels is a common solution.

The use of weathering steel in tower structures has been considered since the 1960s [21], including in the United States, England and Wales, Czechoslovakia [22] and Japan. In China, weathering steels have been used more widely since 2018 because bolted connections, which were made of galvanised steel, had been a problem for a long time [20]. The problem was solved by using weathering steel to produce the bolts, the technology of which is described in more detail in article [20]. In the authors' experience, the issues connected with using weathering steel in tower manufacturing in Poland are related to crevice corrosion (Photo 3), which was one of the reasons why this material ceased to be used in tower construction.

nia drobnych uszkodzeń powłoki cynkowej na stalowych elementach konstrukcyjnych należy je po uprzednim oczyszczeniu zabezpieczyć dwiema warstwami farby cynkowej zawierającej co najmniej 95% cynku w suchej warstwie. Ostateczna grubość powłoki na sucho powinna wynosić co najmniej 150  $\mu\text{m}$ . Większe uszkodzenia lub wady systematyczne cynkowania można naprawiać wyłącznie przez cynkowanie ogniowe.

Stalowe elementy konstrukcji kratownicowej powinny być zabezpieczone systemem do ochrony przed korozją, na który składają się:

- grunt wysokocynkowy o minimalnej grubości 40  $\mu\text{m}$ ,
- powłoka międzywarstwowa epoksydowa z wypełniaczem płatkowym z tlenku żelaza, o grubości minimalnej 60  $\mu\text{m}$ ,

- powłoka nawierzchniowa poliuretanowa lub akrylowo-epoksydowa o grubości co najmniej 60  $\mu\text{m}$ .

Kompletny system malarski jest objęty gwarancją na okres nie krótszy niż 5 lat od daty odbioru końcowego.

Ciekawe rozwiązanie dotyczące konstrukcji słupowych przedstawiono w dokumencie z 2022 roku [18] wydanym przez Ministerstwo Energii w Indiach. W specyfikacji technicznej konstrukcji linii przesyłowych zaleca się stosowanie słupów w kształcie pałowym ze względu na to, że wieże tego typu zajmują mniejszy obszar, cechują się większą wytrzymałością w ekstremalnych warunkach pogodowych (mniejszym momentem zginającym u podstawy) i większą estetyką. Jako zabezpieczenie antykorozyjne wymagana jest zanurzeniowa powłoka cynkowa nałożona na konstrukcję po zaokrągleniu wszystkich krawędzi. Minimalna ilość powłoki cynkowej w  $\text{g}/\text{m}^2$  i średnia grubość powłoki w  $\mu\text{m}$  dla elementów do 5 mm grubości powinna wynosić 460/65, a dla elementów powyżej 5 mm grubości: 610/87. W wypadku konstrukcji znajdujących się w strefie do 20 km od morza wielkości te powinny wynosić odpowiednio: 610/87 i 900/127. Drugą technologią antykorozyjną wymienioną w opisywanych zaleceniach są natryskiwane cieplnie powłoki cynkowe. Nie podano jednak wymagań dotyczących tych powłok.

#### 4. Rozwiązania proponowane w literaturze przedmiotu

Większość aktualnych publikacji dotyczących trwałości korozyjnej konstrukcji wieżowych (głównie wież transmisyjnych) pochodzi z Chin, w których gwałtownie rozwija się sieć energetyczną [2–4, 19, 20].

W wielu krajach buduje się przeważnie ocynkowane stalowe konstrukcje wieżowe, zabezpieczane następnie malarskimi powłokami antykorozyjnymi (jest to rozwiązanie preferowane również w Polsce), w Chinach jednak uważa się, że pochłanianie to za dużo energii oraz jest zagrożeniem dla środowiska i zdrowia ludzi [18]. W związku z tym często stosowanym rozwiązaniem jest wykorzystanie stali trudno rdzewiejących.

Zastosowanie stali trudno rdzewiejącej w konstrukcjach wieżowych rozważa się od lat 60. [21], m.in. w Stanach Zjednoczonych, Anglii i Walii, Czechosłowacji [22] i Japonii. W Chinach stali trudno rdzewiejących używa się na szerszą skalę od 2018 roku, ponieważ przez długi okres problem stanowiły połączenia śrubowe, które były ze stali ocynkowanej [20]. W artykule [20] opisano technologię wytwarzania śrub ze stali trudno rdzewiejących, dzięki czemu rozwiązano ten problem. Z doświadczenia auterek wynika, że problemy dotyczące wież ze stali trudno rdzewiejących w Polsce są związane z korozją szczelinową (fot. 3), która była jednym z powodów

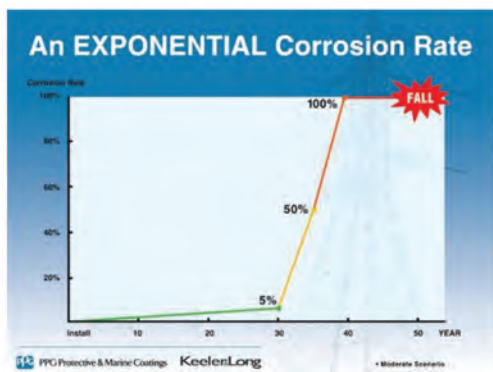


Fig. 1. Rate of corrosion processes

Source: [26, p. 1].

Rys. 1. Szybkość postępowania procesów korozyjnych

Źródło: [26, s. 1].

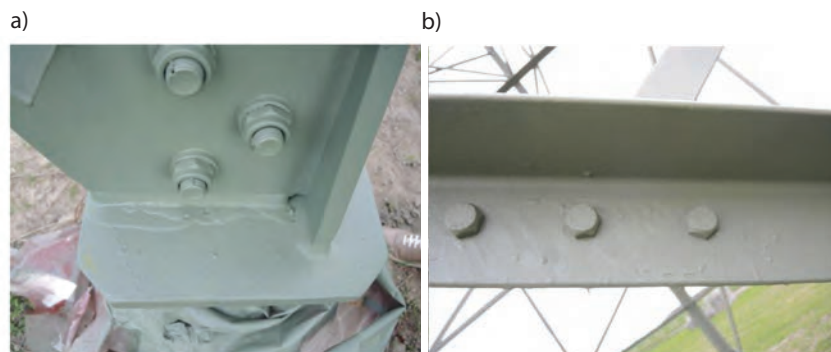


Photo 4. Errors leading to stress in the coatings and, consequently, to their cracking and the formation of subcoating corrosion products: a) thick "pouring" of paint, b) streaks terminating in thick lumps

Fot. 4. Błędy prowadzące do powstawania naprężeń w powłokach, a w konsekwencji do ich pęknięcia i tworzenia się podpowłokowych produktów korozji: a) grube „nalania” farby, b) zacieki kończące się kroplami

New solutions for the corrosion protection of towers are now based on various forms of cathodic protection of elements located in the ground. One of the most common forms of protection for these tower parts is cathodic protection, usually with remote monitoring units (RMUs) [23]. Procedures for controlling the corrosion rate of components of structures buried in the ground (and submerged in water) are described in detail in AMPP NACE SP0169:2-23 [24]. For systems requiring an external power source, solar-powered systems are often designed [17].

Coating systems with a high-zinc primer, containing more than 92% of zinc, also referred to as cold galvanised coatings, are mainly proposed for the renovation of coating protection systems [3, 6–8]. Regarding the renovation of such systems on steel and galvanised steel towers, it is recommended to carry out repairs as soon as possible after the damage has appeared, since crevice corrosion at the coat flaking location and in corroded areas develops more rapidly than the original corrosion processes [2, 25]. A number of strategies used during renovation are presented by M. Dromgool [26]. They are based on determining the rate of corrosion progression (Fig. 1).

It is most favourable to commence renovation when the corrosion damage does not exceed 5% of the surface, or even at a stage when it still covers less than 3% of the surface area. This coincides with the recommendations in EN ISO 12944 [15]. There are also many papers on the corrosion damage of corrosion protection systems, which occurs at the interface between steel and concrete and in the ground. The literature describes the relationship between the corrosion destruction rate and soil composition and the type of concrete [27, 28], as well as the damage mechanism [29].

## 5. Corrosion issues relating to coating corrosion protection observed on new and renovated tower structures

### 5.1. New structures

Many problems that appear later and which result in a shorter than anticipated lifespan of the designed corrosion protection system, are due to application errors. Photographs 4–8 show examples of such errors observed during the study.

When applying a corrosion protection system on new tower structures, during their assembly or when adding paint, a detailed procedure is essential. It is also important to detail unacceptable coating defects in the corrosion protection specification.

wycofania się ze stosowania tego materiału w konstrukcjach wieżowych.

Nowe rozwiązania dotyczące ochrony antykorozyjnej wież opierają się obecnie na różnych formach ochrony katodowej elementów umiejscowionych w gruncie. Jednym z najczęstszych sposobów ochrony tych części wież jest ochrona katodowa, zwykle ze zdalnymi jednostkami monitorującymi (RMU) [23]. Procedury kontroli szybkości korozji elementów konstrukcji zakopanych w gruncie (oraz zanurzonych w wodzie) opisane są dokładnie w normie AMPP NACE SP0169:2-23 [24]. W wypadku systemów wymagających źródła prądu zewnętrznego często projektuje się układy z zasilaniem solarnym [17].

Jako systemy do renowacji zabezpieczeń powłokowych proponowane są głównie systemy powłokowe z gruntem wysokocynkowym, z zawartością cynku powyżej 92%, tzw. cynkowanie na zimno [3, 6–8]. Jeśli chodzi o renowację zabezpieczeń na wieżach stalowych i stalowych ocynkowanych, zaleca się wykonywanie napraw jak najszybciej po ukazaniu się zniszczeń, ponieważ korozja szczelinowa w miejscu łuszczenia się powłok i w miejscach skorodowanych rozwija się szybciej niż pierwotne procesy korozyjne [2, 25]. Wiele strategii stosowanych podczas renowacji opisał M. Dromgool [26]. Podstawą jest w nich określenie szybkości postępowania korozji (rys. 1).

Najkorzystniejsze jest podjęcie prac renowacyjnych, gdy zniszczenia korozyjne nie przekraczają 5% powierzchni, a nawet na etapie, kiedy obejmują jeszcze poniżej 3%. Jest to zbieżne z zaleceniami zawartymi w normie PN-EN ISO 12944 [15]. Wiele prac dotyczy również zniszczeń korozyjnych zabezpieczeń antykorozyjnych, do których dochodzi na granicy połączeń stali i betonu oraz w gruncie. W literaturze przedmiotu opisano zależność szybkości zniszczeń korozyjnych od składu gruntu i rodzaju betonu [27, 28] oraz mechanizm powstawania zniszczeń [29].

## 5. Problemy korozyjne dotyczące powłokowych zabezpieczeń antykorozyjnych zaobserwowane na nowych i poddawanych renowacji konstrukcjach wieżowych

### 5.1. Nowe konstrukcje

Wiele późniejszych problemów, skutkujących krótszą trwałością zaprojektowanych zabezpieczeń antykorozyjnych, niż przewidywano, biorąc pod uwagę rodzaj i grubość powłok oraz zagrożenia korozyjne, wynika z błędów aplikacyjnych. Na fotografiach 4–8 pokazano przykłady takich błędów, zaobserwowane podczas przeprowadzanych badań.

Podczas zabezpieczania nowych konstrukcji wieżowych oraz ich montażu i uzupełniania powłok malarskich niezbędna jest szczegółowa technologia postępowania. Ważne jest również, aby

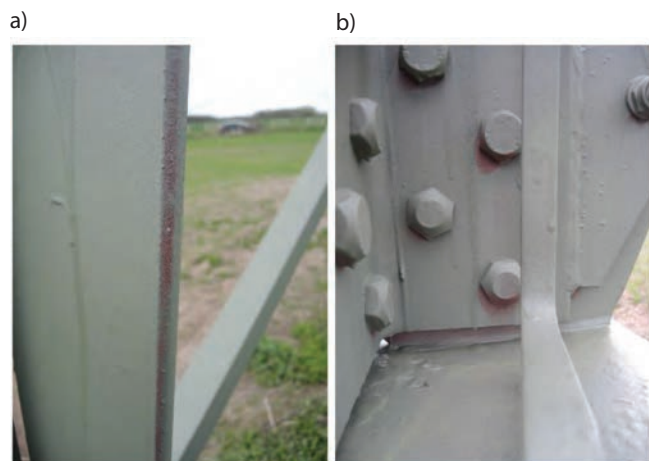


Photo 5. Discontinuities and areas where the coating is thinner: a) underpainting, b) overpainted inclusions and weld spatter, c) insufficient coating thickness in a given corrosive environment

Fot. 5. Nieciągłości i miejsca, w których powłoka jest cieńsza: a) niedomalowania, b) zamalowane wtrącenia i rozpryski spawalnicze, c) zbyt mała grubość powłok w danym środowisku korozyjnym

### 5.2. Structures undergoing renovation

Guidelines for tower structure renovation methods are contained, among others, in the technical requirements of PSE S.A. [16]. The specification distinguishes between local renovation of steel structures, which is referred to when corrosion damage to the coating system reaches degree Ri2 according to PN-EN ISO 4628-3:2016-03 [30] and affects 0.5% of the structure's surface, and complete renovation, carried out when corrosion damage to the coating system reaches degree Ri3 and affects 1% of the structure's surface. The qualification of a galvanised structure for painting should be carried out in accordance with PN-EN ISO 10289:2002 [31] when the corrosion protection index RP reaches degree 5 and encompasses a minimum of 5% of the total surface area of the structure.

Complete renovation of previously painted steel structures according to PSE S.A. specifications [16] includes preparation of the surface to be painted together with assessment of the old coating and reapplication of paint coatings. Whether the old paint coating can be left on the structure is determined by measuring the thickness and assessing the adhesion of the coatings to the substrate and the interlayer adhesion. When the thickness of the old coatings exceeds 600  $\mu\text{m}$ , it is recommended to remove them from the metal substrate. Depending on the evaluation method used, the substrate adhesion and interlayer adhesion should be min. 3 MPa (according to PN-EN ISO 16276-1:2008 [32]) or have a maximum grade of 2, if measured using the cross-cut and X-cut

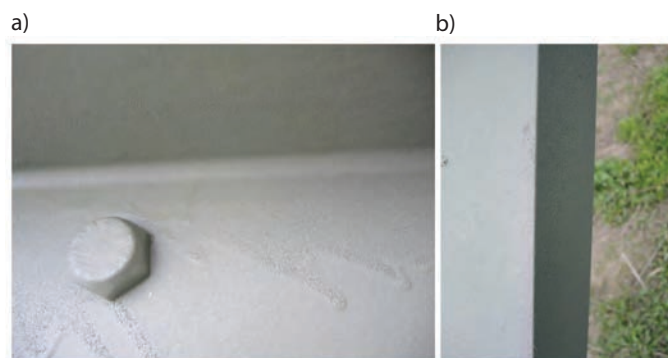


Photo 6. Unevenness of coatings leading to accumulation of electrolytes on the surface and changes in the aggressiveness of the corrosive environment: a) sponginess of coatings caused by too intensive mixing of paint leading to its aeration or use of an excessive amount or incorrect type of thinner, b) dry spraying on the coating

Fot. 6. Nierówności powłoki prowadzące do gromadzenia się elektrolitów na powierzchni i zmiany agresywności środowiska korozyjnego: a) gąbczastość powłoki spowodowana zbyt intensywnym mieszaniem farby prowadzącym do jej napowietrzenia lub użyciem nadmiernej ilości albo niewłaściwego typu rozcieńczalnika, b) suchy natrysk na powłocę



Photo 7. Lack of joint protection leading to joint corrosion and detachment of coatings around the joint

Fot. 7. Brak zabezpieczenia szczelin prowadzący do korozji szczelinowej i delaminacji powłok wokół szczeliny

w specyfikacji zabezpieczenia antykorozyjnego wyszczególnić nie-dopuszczalne wady powłok.

### 5.2. Konstrukcje poddawane renowacji

Wytyczne dotyczące metod wykonywania renowacji konstrukcji wieżowych są zawarte m.in. w wymaganiach technicznych PSE S.A. [16]. W specyfikacji rozróżnia się renowację miejscową konstrukcji stalowych, o której mowa, gdy uszkodzenia korozyjne systemu powłokowego osiągną stopień Ri2 według PN-EN ISO 4628-3:2016-03 [30] i dotyczą 0,5% powierzchni konstrukcji, oraz całkowitą, przeprowadzaną, kiedy uszkodzenia korozyjne systemu powłokowego osiągną stopień Ri3 i dotyczą 1% powierzchni konstrukcji. Kwalifikacja konstrukcji ocynkowanej do malowania powinna przebiegać zgodnie z normą PN-EN ISO 10289:2002 [31], gdy wskaźnik ochrony przed korozją  $R_p$  osiągnie stopień 5 i dotyczy minimum 5% powierzchni całkowitej konstrukcji.

Całkowita renowacja uprzednio malowanych konstrukcji stalowych według specyfikacji PSE S.A. [16] obejmuje przygotowanie powierzchni do malowania wraz z oceną starego pokrycia oraz ponowne naniesienie powłok malarskich. O tym, czy można zostawić na konstrukcji stare pokrycie malarskie, decyduje pomiar grubości oraz ocena przyczepności powłok do podłoża i przyczepności międzywarstwowej. Gdy grubość starych powłok przekracza wartość 600  $\mu\text{m}$ , zaleca się ich usunięcie z podłoża metalowego. W zależności od zastosowanej metody oceny przyczepność do podłoża oraz międzywarstwowa powinna wynosić min. 3 MPa (według PN-EN ISO



Photo 8. Improper seasoning of coatings applied at the construction site (application of a plastic film over a non-dry coating) leading to coating damage and long-term penetration of solvent from the topcoat into the primer coat

Fot. 8. Niewłaściwe warunki sezonowania powłok naniesionych na placu budowy (zabezpieczenie niewyschniętej powłoki plastikową folią) prowadzące do uszkodzeń powłoki oraz długotrwałej penetracji rozpuszczalnika z warstwy nawierzchniowej do powłoki gruntującej

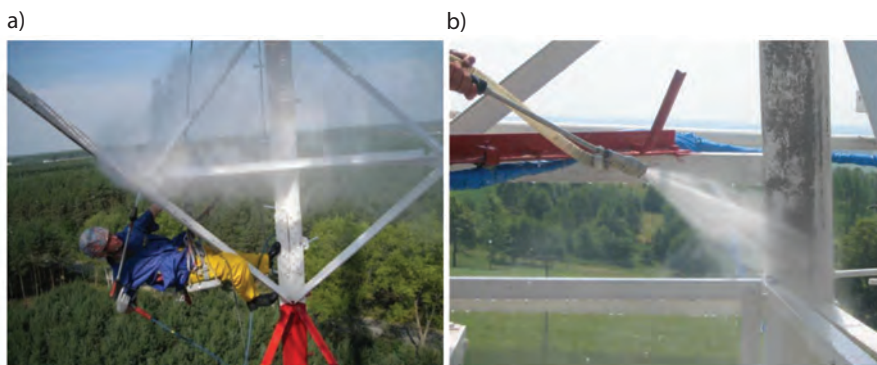


Photo 9. Corrosion at the boundary of left-over fragments of old coatings (a) and detachment of a coating applied over an old coating improperly prepared for overpainting (b)

Fot. 9. Korozja na granicy pozostawionych fragmentów starych powłok (a) oraz delaminacja powłoki nałożonej na niewłaściwie przygotowaną do przemalowania starą powłokę (b)



Photo 10. Brush application of coatings

Fot. 10. Nanoszenie powłok malarskich pędzłami

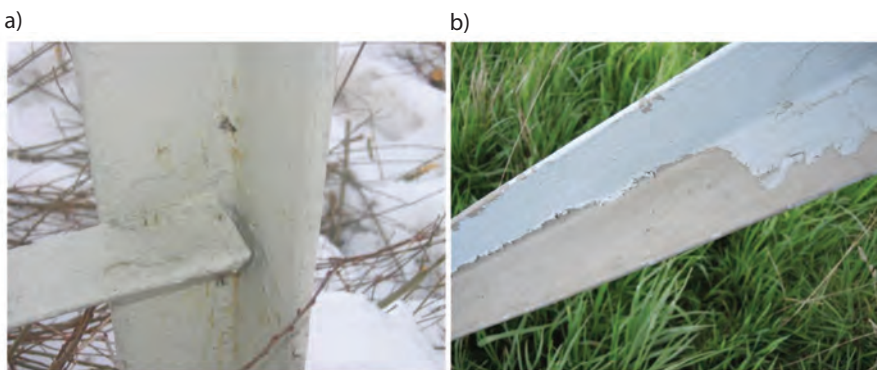


Photo 11. Surface preparation with pressurised water: a) execution of the process b) view of the cleaned structure (photo: Bernadeta Szczepańska)

Fot. 11. Przygotowanie powierzchni wodą pod ciśnieniem: a) realizacja procesu b) widok czyszczonej konstrukcji (fot. Bernadeta Szczepańska)

method (according to PN-EN ISO 16276-2:2008 [33]). The treated surface must be cleaned to at least grade PSt 2, PSt 3 or PMA, according to PN-EN ISO 8501-2:2011 [34]. Thorough treatment to grade St2 or St3 according to PN-EN ISO 8501-1:2008 [35] is also possible.

The complete renovation of hot-dip galvanised steel structures includes the removal of zinc corrosion products (fully aged zinc) and iron corrosion products. The recommended method of preparing the substrate for painting is sweep blasting combined with pressure washing or with a preparation recommended by the coating system manufacturer. Removal of loose solid contaminants, zinc and steel corrosion products by grinding or brushing is recommended.

For complete renovation of steel and galvanised steel support structures, coating systems with an appropriate technical recommendation from PSE S.A. should be used.

When carrying out expert opinions of corrosion damage to tower structures, it has been observed that renovation work is carried out at a much higher intensity of corrosion damage than indicated in the PN-EN ISO 12944 standard, according to which a structure qualifies for complete renovation when Ri3 degree corrosion occurs on approximately 10% of the structure's surface [15]. The most common method of repairing tower structures, as observed during on-site expert opinions, is to recoat surfaces that have been insufficiently cleaned. Only completely loose coatings are sometimes removed in places. The effects of this type of renovation are shown in Photo 9.

Problems with the renovation of coatings on the structures in question are primarily due to the fact that:

16276-1:2008 [32]) albo mieć max. stopień 2, jeśli pomiar jest przeprowadzany metodą siatki nacięć lub nacięcia krzyżem (zgodnie z PN-EN ISO 16276-2:2008 [33]). Obrabianą powierzchnię należy oczyścić do co najmniej stopnia PSt 2, PSt 3 lub PMA, zgodnie z PN-EN ISO 8501-2:2011 [34]. Możliwa jest również gruntowna obróbka do stopnia St2 lub St3 według normy PN-EN ISO 8501-1:2008 [35].

Całkowita renowacja konstrukcji stalowych ocynkowanych ognio-wo obejmuje usuwanie produktów korozji cynku (w pełni starzonego cynku) oraz produktów korozji żelaza. Zalecaną metodą przygotowania podłoża pod malowanie jest omiatanie ścierniwem (*sweep blasting*) połączone z myciem pod ciśnieniem lub preparatem rekomendowanym przez producenta systemu malarskiego. Zaleca się usuwanie luźno przylegających zanieczyszczeń stałych, produktów korozji cynku i stali metodą szlifowania lub szczotkowania.

Do całkowitej renowacji wsporczych konstrukcji stalowych i stalowych ocynkowanych należy stosować systemy malarskie posiadające stosowną rekomendację techniczną PSE S.A.

Wykonując ekspertyzy zniszczeń korozyjnych konstrukcji wieżowych, można zaobserwować, że prace renowacyjne są podejmowane przy dużo większym nasileniu zniszczeń korozyjnych niż wskazane w normie PN-EN ISO 12944, zgodnie z którą konstrukcja kwalifikuje się do renowacji całkowitej, kiedy skorodowanie w stopniu Ri3 występuje na około 10% powierzchni konstrukcji [15]. Najczęściej obserwowana podczas wizji lokalnych przeprowadzanych na potrzeby ekspertyz metoda napraw konstrukcji wieżowych to przemalowywanie następną powłoką powierzchni, które prawie

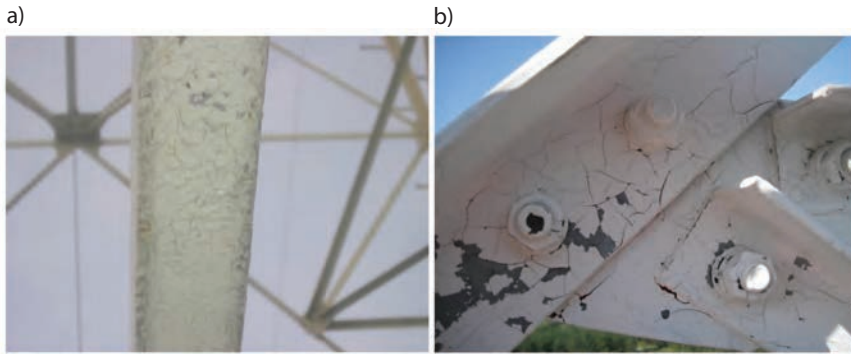


Photo 12. Defects of incompatible coatings: a) so-called crocodile skin effect, b) cracking and detachment of coatings

Fot. 12. Wady niekompatybilnych powłok: a) tzw. efekt skóry krokodyla, b) spękanie i delaminacja powłok



Photo 13. Low surface roughness after cleaning with a grinder (photo: Grzegorz Wasylczyszyn)

Fot. 13. Niska chropowatość powierzchni po czyszczeniu szlifierką (fot. Grzegorz Wasylczyszyn)

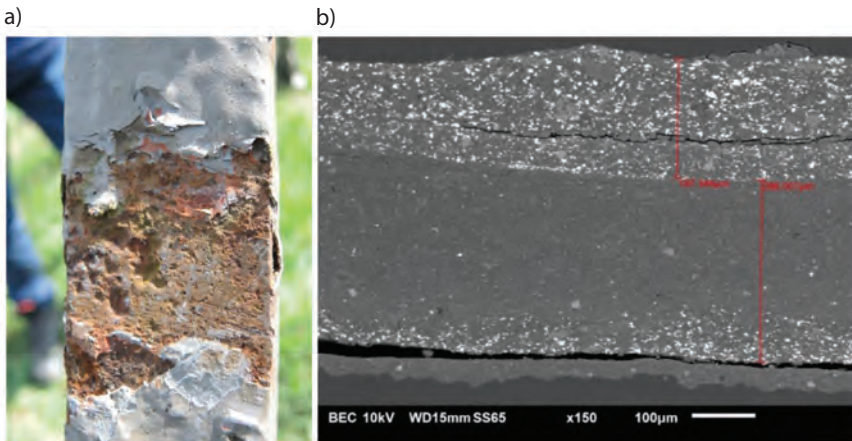


Photo 14. Separation of a repeatedly repainted thick coating (a) and fragments of detached coatings with visible interlayer separations – scanning microscope image (b)

Fot. 14. Odsolenie wielokrotnie przemalowywanej powłoki o dużej grubości (a) oraz fragmenty zdeldaminowanych powłok z widocznymi odsoleniami międzypowłokowymi – obraz z mikroskopu skaningowego (b)



Photo 15. Corrosion in unprotected cracks

Fot. 15. Korozja w niezabezpieczonych szczelinach

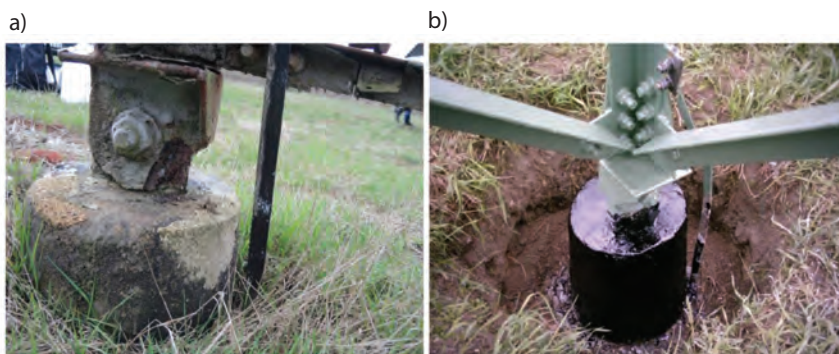


Photo 16. A completely deteriorated component binding the steel structure to the concrete foundation (a) and an example of a properly protected fixture binding the steel structure to the concrete foundation and of a concrete component in the ground

Fot. 16. Całkowicie zniszczony element mocujący konstrukcję stalową do posadowienia betonowego (a) oraz przykład właściwego zabezpieczenie elementu mocującego konstrukcję stalową z posadowieniem betonowym i elementu betonowego w gruncie

- encapsulation of the structures, which would allow the use of surface preparation technology by blast cleaning or high-pressure water, is difficult and expensive;
- the restoration paint work on transmission towers must be carried out at short notice (due to the need to shut down the line);
- the work is difficult and dangerous for contractors;
- strong winds must be considered when painting the higher parts of the structure;

nie zostały wcześniej oczyszczone. Czasem jedynie miejscowo usuwa się zupełnie luźno związane powłoki. Efekty tego typu renowacji pokazano na fot. 9.

Problemy z renowacją powłok malarskich na omawianych konstrukcjach wynikają przede wszystkim z tego, że:

- obudowanie konstrukcji, które pozwoliłoby na zastosowanie technologii przygotowania powierzchni poprzez czyszczenie strumieniowo-ścierne lub wodą pod wysokim ciśnieniem, jest trudne i kosztowne;
- prace polegające na malowaniu renowacyjnym wież przesyłowych muszą zostać przeprowadzone w krótkim czasie (ze względu na konieczność wyłączenia linii);
- prace te są trudne i niebezpieczne dla wykonawców;
- podczas malowania wyższych części konstrukcji trzeba uwzględnić silny wiatr,
- wyrobienie wszystkich krawędzi, śrub oraz zabezpieczenie szczelin jest bardzo pracochłonne.

Kolejne zdjęcia dokumentują wykonywanie prac antykorozyjnych na wieżach. Na fot. 10 pokazane są wymalowania pędzlami źle przygotowanej powierzchni, a na fot. 11 czyszczenie wodą pod wysokim ciśnieniem, które pozwala na prawidłowe przygotowanie powierzchni, ale jest rzadko przeprowadzane.



– preparing all edges, screws and securing gaps is very labour-intensive. The following photos document the execution of anti-corrosion work on towers. Photo 10 shows brush painting of an improperly prepared surface, and photo 11 shows high-pressure water cleaning, which allows proper surface preparation, a method that is rarely carried out.

The main reasons for failed renovations include:

- incompatibility of coatings (Photo 12),
- unprepared or inadequate surface preparation, e.g. leaving old coatings with poor adhesion and rough edges,
- surface roughness too low after spot cleaning with a grinder (Photo 13),
- repeated repainting of coatings that are already thick, leading to high stress in the coating, causing cracking and peeling (Photo 14),
- “flooding” deep corrosion pits with paint, resulting in stress formation and coating detachment,
- leaving unprotected cracks (Photo 15),
- inadequately secured fixing of structures to the ground (Photo 16).

## 6. Conclusion

Ensuring proper and long-lasting corrosion protection of tower structures is difficult due to their openwork, spatial design. This article describes methods of protecting and repairing tower structures and the requirements for corrosion protection included in normative documents and national specifications. It also discusses trends in the development of anti-corrosion technologies ensuring a longer service life of tower structures. The problems of coating corrosion protection identified in the study relate to structures after many years of operation and having undergone inadequate complete and partial renovation work. However, application errors observed on new structures show that, despite the detailed specifications for carrying out corrosion protection work, e.g. for power towers and pylons, the biggest problem still lies in ensuring an adequate quality of the first coating protection system.

It seems that only by carrying out renovation work on sheltered structures, so that modern cleaning and coating application technologies can be applied (which is how renovation work is carried out in many countries), can the durability of the renovated sites be guaranteed.

In the case of new buildings, supervision by a qualified inspector is sufficient. This will ensure that renovation work can be postponed for many years.

### Acknowledgements

The authors wish to thank Bernadeta Szczepańska, Jacek Bordziłowski and Grzegorz Wasylczyszyn for their photographs.

Główne powody nieudanych renowacji to:

- niekompatybilność powłok (fot. 12),
- nieprzygotowanie bądź niewłaściwe przygotowanie powierzchni, np. pozostawianie starych powłok o niskiej przyczepności i z niesfazowanymi krawędziami,
- za niska chropowatość powierzchni po miejscowym czyszczeniu szlifierkami (fot. 13),
- wielokrotne przemaalowywanie powłok o już dużej grubości, co prowadzi do powstawania w nich wysokich naprężeń, powodujących pękanie i odpajanie (fot. 14),
- „zalewanie” farbą głębokich wżerów korozyjnych, powodujące powstawanie naprężeń i delaminację powłok,
- pozostawianie niezabezpieczonych szczelin (fot. 15),
- niewłaściwie zabezpieczone mocowanie konstrukcji w gruncie (fot. 16).

## 6. Podsumowanie

Konstrukcje wieżowe, z uwagi na ażurową, przestrzenną budowę, są obiektami, na których trudno prawidłowo wykonać zabezpieczenia antykorozyjne o wysokiej trwałości. W artykule opisano metody zabezpieczania i napraw konstrukcji wieżowych oraz wymagania dotyczące zabezpieczeń antykorozyjnych ujęte w dokumentach normatywnych i specyfikacjach krajowych. Omówiono ponadto kierunki rozwoju technologii antykorozyjnych wpływających na dłuższą trwałość konstrukcji wieżowych. Wskazane w opracowaniu problemy z zakresu powłokowych zabezpieczeń antykorozyjnych dotyczą obiektów po wieloletniej eksploatacji oraz niewłaściwych metod renowacji całkowitej i częściowej. Błędy aplikacyjne zaobserwowane na nowych obiektach świadczą jednak o tym, że pomimo szczegółowej specyfikacji wykonywania zabezpieczeń antykorozyjnych, np. wież i słupów elektroenergetycznych, nadal największym problemem jest uzyskanie pierwotnych powłok o odpowiedniej jakości.

Wydaje się, że jedynie prowadzenie prac renowacyjnych na osłoniętych obiektach, tak by możliwe było zastosowanie współczesnych technologii czyszczenia i aplikacji powłok (tak wykonuje się renowacje w wielu krajach), gwarantuje wysoką trwałość odnawianych obiektów.

W wypadku nowych obiektów wystarczy nadzór wykwalifikowanego inspektora – prace renowacyjne zostaną odsunięte na wiele lat.

### Podziękowania

Autorki składają serdeczne podziękowania autorom zdjęć: Bernadecie Szczepańskiej, Jackowi Bordziłowskiemu oraz Grzegorzowi Wasylczyszynowi.

## BIBLIOGRAPHY

- [1] K. Wirth. 2019. „O czasie życia kratowych wież stalowych”. *Inżynier Budownictwa* 5. <https://inzynierbudownictwa.pl/o-czasie-zycia-kratowych-wiez-stalowych/> (access: 22.08.2023).
- [2] Xinmei Li, Zhongwen Zhang, Baoshuai Du, Wen Li, Shuai Suo. 2020. “Development Status of Anti-Corrosion Technology for Power Transmission Tower’s Steel Structure.” *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 546: 052010. DOI: 10.1088/1755-1315/546/5/052010.
- [3] N. Fuse, A. Naganuma, T. Fukuchi Y. Hori, M. Mizuno, K. Fukunaga. 2015. “Underfilm Corrosion of Transmission Tower Cross-Arms Service-Used in a Pacific Coast Area.” *Corrosion* 71(11): 1387–1397. DOI: 10.5006/1736.
- [4] B. Romero, J. M. Minchala, N. Angulo, E. Carrasquero, L. E. Gil. 2019. “Corrosive Deterioration of Assembly Components in an Electrical Transmission Tower.” *Universidad Ciencia Y Tecnología* 23(90): 60–71.
- [5] Bo Tao, Li Cheng, Jiuyi Wang, Xinlong Zhang, Ruijin Liao. 2022. “A Review on Mechanism and Application of Functional Coatings for Overhead Transmission Lines.” *Frontiers in Materials* 9: 995290. DOI: 10.3389/fmats.2022.995290.
- [6] <http://www.steeltowerchn.com/technical-specifications/steel-tower-corrosion-protection/corrosion-and-protection-of-transmission-steel-structure-tower/> (access: 22.08.2023).

- [7] D. Gaughen, T. A. Hoffard. 1999. *Moisture Cured Urethane (MCU) Coatings for Antenna Tower: A Feasibility Study*. Technical memorandum TM-2318-SHR. Port Hueneme, California: Naval Facilities Engineering Service Center.
- [8] K. Hesse. 2023. "Hot-dip vs Cold Galvanizing: What's the Difference?" Galvanizer Society of Australia. <https://gaa.com.au/2023/01/19/hot-dip-vs-cold-galvanizing-whats-the-difference> (access: 22.08.2023).
- [9] <https://www.zrcworldwide.com/technical-data> (access: 22.08.2023).
- [10] M. I. Abdou, A. M. Fadl. 2019. "Assessment of Nano-FeTiO<sub>3</sub>/Non Crystalline Silica Cold Galvanizing Composite Coating as a Duplex Corrosion Guard System for Steel Electricity Transmission Towers in Severe Aggressive Media." *Construction and Building Materials* 223: 705–723. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.017.
- [11] A. M. Al-Sabagh, M. I. Abdou, M. A. Migahed, A. M. Fadl, M. F. El-Shahat. 2018. "Influence of Surface Modified Nanoilmenite/Amorphous Silica Composite Particles on the Thermal Stability of Cold Galvanizing Coating." *Egyptian Journal of Petroleum* 27(1): 137–144. DOI: 10.1016/j.ejpe.2017.02.002.
- [12] PN-EN 1993-3-1:2008: Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 3–1: Wieże, maszty i kominy – Wieże i maszty.
- [13] PN-EN ISO 1461:2023-02: Powłoki cynkowe nanoszone na wyroby stalowe i żeliwne metodą zanurzeniową – Wymagania i metody badań.
- [14] PN-EN ISO 14713-1:2017-08: Powłoki cynkowe – Wytyczne i zalecenia dotyczące ochrony przed korozją konstrukcji z żeliwa i stali – Część 1: Zasady ogólne dotyczące projektowania i odporności korozyjnej.
- [15] Seria norm PN-EN ISO 12944: Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich. Części 1–9.
- [16] Wymagania techniczne PSE S.A. dotyczące zabezpieczeń antykorozyjnych konstrukcji stalowych i stalowych ocynkowanych. PSE-TS.ANTYKOR PL/2021. Departament Standardów Technicznych PSE S.A.
- [17] Specification for Installation of Overhead Transmission Lines. 2020. Petroleum Development Oman L.L.C.: SP-1101, revision: 5.0.
- [18] Standard Technical Specification for Steel Monopole Structure for AC Transmission Line. 2022. Government of India–Ministry of Power–Central Electricity Authority.
- [19] Tian Tian, Shiwu Xiao. 2018. "Electrochemical Anti-Corrosion System of Iron Tower Based on Solar Power Supply." *MATEC Web of Conferences* 160: 03006. DOI: 10.1051/mateconf/201816003006.
- [20] Shangwu Zeng, Delu Xu, Daijun Li, Guang Li, Jianwei Chang, Chao Fu. 2020. "A Study on Weathering Steel Bolts for Transmission Towers." *Journal of Constructional Steel Research* 174: 106295. DOI: 10.1016/j.jcsr.2020.106295.
- [21] S. K. Coburn, G. W. Gilliland, J. C. Pohlman. 1963. "Bare Steel Structures: A New Concept." *Electrical Engineering* 82(11): 666–672. DOI: 10.1109/EE.1963.6539711.
- [22] V. Křivý, Z. Vašek, M. Vacek, L. Mynarová. 2022. "Corrosion Damage to Joints of Lattice Towers Designed from Weathering Steels." *Materials* 15(9): 3397. DOI: 10.3390/ma15093397.
- [23] Mobiltext. 2022. "Future-Focused Power Infrastructure Integrity Programs Rely on Cathodic Protection Remote Monitoring." <https://www.mobiltext.com/wp-content/documents/Mobiltext-CP-Power-Towers-WP-0822.pdf> (access: 22.08.2023).
- [24] AMPP NACE SP0169:2013: NACE International Standard Recommended Practice: Control of External Corrosion on Underground or Submerged Metallic Piping Systems.
- [25] A. Taranczewski. 2008. „Dwa typowe przykłady błędów wykonawczych na wieżach antenowych i słupach wysokiego napięcia." *Ochrona przed Korozją* 2: 60–61.
- [26] M. Dromgool. 2016. "Corrosion Management of Elevated Lattice Galvanized Structures." *Journal of Protective Coatings and Linings* 33(6): 22–32.
- [27] A. de Oliveira Fraga, M. A. Klunk, A. A. de Oliveira, G. Gonçalves Furtado, G. Knörnschild, L. F. Pinheiro Dick. 2014. "Soil Corrosion of the AISI1020 Steel Buried near Electrical Power Transmission Line Towers." *Material Research* 17(6): 1637–1643. DOI: 10.1590/1516-1439.305714.
- [28] R. Krishnasamy, G. Shyamala, S. Christian Johnson, K. Sabarinathan, S. M. Sakthivel, K. Rajesh Kumar. 2020. "Performance Management of Transmission Line Tower Foundations against Corrosion by Non-Destructive Testing." *International Journal of Engineering and Advanced Technology* 9(3): 443–447. DOI: 10.35940/ijeat.C4731.029320.
- [29] S. Johnson, G. S. Thirugnanam. 2010. "Experimental Study on Corrosion of Transmission Line Tower Foundation and Its Rehabilitation." *International Journal of Civil and Structural Engineering* 1: 27–34.
- [30] PN-EN ISO 4628-3:2016-03: Farby i lakiery – Ocena zniszczenia powłok – Określanie ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 3: Ocena stopnia zardzewienia.
- [31] PN-EN ISO 10289:2002: Metody badań korozyjnych powłok metalowych i innych powłok nieorganicznych na podłożach metalowych – Ocena próbek i wyrobów gotowych poddanych badaniom korozyjnym.
- [32] PN-EN ISO 16276-1:2008: Ochrona konstrukcji stalowych przed korozją za pomocą ochronnych systemów malarskich – Ocena i kryteria przyjęcia adhezji/kohezji (wytrzymałości na odrywanie) powłoki – Część 1: Badanie metodą odrywania.
- [33] PN-EN ISO 16276-2:2008: Ochrona konstrukcji stalowych przed korozją za pomocą ochronnych systemów malarskich – Ocena i kryteria przyjęcia adhezji/kohezji (wytrzymałości na odrywanie) powłoki – Część 2: Badanie metodą siatki nacięć i metodą nacięcia w kształcie X.
- [34] PN-EN ISO 8501-2:2011: Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów – Wzrokowa ocena czystości powierzchni – Część 2: Stopnie przygotowania wcześniej pokrytych powłokami podłoży stalowych po miejscowym usunięciu tych powłok.
- [35] PN-EN ISO 8501-1:2008: Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów – Wzrokowa ocena czystości powierzchni – Część 1: Stopnie skorodowania i stopnie przygotowania niepokrytych podłoży stalowych oraz podłoży stalowych po całkowitym usunięciu wcześniej nałożonych powłok.

