

dr hab. inż. Marek Maj, prof. uczelni^{1)*}

ORCID: 0000-0002-4151-7298

mgr inż. Janusz Banera²⁾

Durability of protective coatings of reinforced concrete surfaces in tanks for chemically aggressive liquids

Trwałość powłok ochronnych powierzchni żelbetowych w zbiornikach na ciecz chemicznie agresywne

DOI: 10.15199/33.2025.09.08

Abstract. A series of failures in the use of polyurea as a protective material applied to the walls and bottoms of reinforced concrete tanks, e.g. swimming pools and in sewage treatment plants, during their renovation, requires a thorough analysis of the causes of failures occurring not only during application but also at the stage of designing the repair technology. In particular, more thorough analysis should be performed on those failures that repeat several times on the same object within a short period of time. They cause high renovation costs and long-term exclusion of tanks from the sewage treatment technology. The causes of failures depend primarily on insufficient knowledge regarding the possible types of physical damage to polyurea coatings described e.g. in [1÷4]. However, failures in the applied coatings should be seen in the limited analysis of the entire technological project from the assumption phase to the completion of works and further monitoring of the technical condition during the operation of the tanks. In the presented selected repaired tanks, those elements of the entire technological project that had the greatest impact on the failure of the repair works carried out several times were isolated from the entire technological project.

Keywords: tanks; polyurea; sealing coatings; concrete corrosion; repair.

Streszczenie. Wiele niepowodzeń w zastosowaniu polimocznika, jako materiału ochronnego aplikowanego na ściany i dna żelbetowych zbiorników np. basenów kąpielowych i w oczyszczalniach ścieków, podczas ich renowacji, zmusza do wnikliwej analizy przyczyn awarii występujących nie tylko w czasie aplikacji, ale także na etapie projektowania technologii naprawy. Szczególnie wnikliwej analizie należy poddać te awarie, które powtarzają się kilkakrotnie w tym samym obiekcie w krótkich odstępach czasu. Powodują one wysokie koszty remontu i długotrwałe wyłączenie zbiorników z oczyszczania ścieków. Przyczyny awarii zależą przede wszystkim od niedostatecznej wiedzy dotyczącej możliwych rodzajów fizycznych uszkodzeń powłok polimocznikowych opisanych np. w [1÷4]. Niepowodzeń w aplikowanych powłokach należy jednak upatrywać w ograniczonej analizie całego projektu technologicznego od fazy założeń do zakończenia prac i dalszego monitoringu stanu technicznego w czasie eksploatacji zbiorników. W prezentowanych naprawionych zbiornikach wyodrębniono te jego elementy, które miały największy wpływ na niepowodzenie kilkakrotnie przeprowadzanych prac naprawczych.

Słowa kluczowe: zbiorniki; polimocznik; powłoki uszczelniające; korozja betonu; naprawa.

According to [5÷7], 26,523 wastewater treatment plants in Europe process wastewater from 447 million residents and small industrial plants, which is discharged into public sewers. This wastewater contains pharmaceutical residues, pesticides, nutrients, organic matter, microplastics, and hazardous substances. Scientists suggest that it is necessary to determine why, after decades of regulatory interventions, the ecological status of European streams fails to meet the requirements of the European Water Framework Directive (WFD). Wastewater treatment plants also require improvements, demonstrating the importance attached to this sector of the economy. Since 1995, when 1,220 municipal wastewater treatment plants were registered in Poland, their number at the end of 2022 was 3,260 [7÷9]. Considering that wastewater treatment

godnie z [5÷7] w Europie 26 523 oczyszczalnie ścieków przetwarzają ścieki pochodzące od 447 mln mieszkańców i małych zakładów przemysłowych, które odprowadzane są do publicznych kanałów ściekowych. Ścieki te obejmują pozostałości farmaceutyczne, pestycydy, składniki odżywcze, materię organiczną, mikroplastiki i substancje niebezpieczne. Naukowcy sugerują, że należy ustalić, dlaczego po dziesięcioleciach interwencji regulacyjnych stan ekologiczny europejskich strumieni nie spełnia wymagań Europejskiej Ramowej Dyrektywy Wodnej (RDW). Usprawnienia wymagają także oczyszczalnie ścieków, co wskazuje, jak dużą wagę przywiązuje się do tego sektora gospodarki.

Od 1995 r., w którym zarejestrowano w Polsce 1220 oczyszczalni ścieków komunalnych, ich liczba na koniec 2022 r. wynosiła 3260 [7÷9]. Biorąc pod uwagę, że oczyszczalnie ścieków w dużych miastach posiadają nawet po kilkanaście olbrzymich zbiorników każdego rodzaju ścieków i porównując to z ogólną liczbą oczyszczalni ścieków w Polsce, to każdy z kilkudziesięciu tysięcy zbiorników co kilka lat musi być

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

²⁾ SIKA Poland Sp. z o.o.

^{*)} Correspondence address: marek.maj@pwr.edu.pl



plants in large cities have up to a dozen or so enormous tanks for each type of wastewater, and compared to the total number of wastewater treatment plants in Poland, each of the tens of thousands of tanks must be renovated every few years. In addition to sewage treatment plant reservoirs, the water and sewage management infrastructure includes clean water reservoirs for supplying residents with drinking water.

Investment expenditures in water and sewage management have increased significantly in Poland. For example, in 2007–2013, €2,784 million in European funding was allocated for investments in the water and sewage management sector under the “Infrastructure and Environment Investment Programme” [8]. Furthermore, according to [9], investments under the National Municipal Wastewater Treatment Programme are needed in the years 2012–2027 to implement the directive on municipal wastewater treatment. These investments are estimated at over PLN 26 billion. This is due to the fact that, for example, 167 agglomerations with more than 15,000 inhabitants in Poland do not meet the requirements of the directive [7]. However, this is a small portion of the total expenditures related to the creation, maintenance, and cyclical maintenance of water and sewage management infrastructure.

Due to the increasing “chemical and physical stress” on reinforced concrete tank structures, the failure rate of repair construction projects, whose completion results are worse than expected, is also increasing. The failure of these construction projects is attributed to numerous factors, such as the low level of technical expertise preceding the renovation, the lack of experience of the designers developing the repairs, and the selection of an unsuitable contractor, primarily due to the lowest price criterion. A comprehensive assessment of the investment risk, including the cost, time, and quality of the renovation work, as well as the full scope of planned construction activities, is also often overlooked. The period between subsequent repairs to damaged surfaces of tanks in use in sewage treatment plants has been steadily shortening for several decades (the time between repairs has become significantly shorter than expected). The primary factor causing accelerated damage to protective coatings is the constantly increasing concentration of harmful chemicals in wastewater, caused by decreasing water consumption and the increasing amount of chemicals in production systems. For these reasons, the surfaces of concrete walls and tank bottoms require increasingly better protection.

Factors contributing to failures and ineffective repairs

Of the many causes of protective coating failure [1, 10], the most important are:

- unprepared substrate for application, ignorance of the requirements for concrete substrates, excessively damp substrates;
- inappropriate use of the type of polyurea applied to the environmental conditions in which the coating operates;

poddany renowacji. Dodatkowo, oprócz zbiorników oczyszczalni ścieków, w ramach infrastruktury gospodarki wodno-ściekowej występują zbiorniki wody czystej na potrzeby zaopatrzenia mieszkańców w wodę pitną.

W Polsce zwiększyły się znacznie wydatki inwestycyjne gospodarki wodno-ściekowej, np. w latach 2007–2013 na dofinansowanie z funduszy europejskich na inwestycje w sektorze gospodarki wodno-ściekowej rozdysponowano w ramach „Programu Inwestycyjnego Infrastruktura i Środowisko” kwotę 2784 mln euro [8]. Ponadto, wg [9], w latach 2012–2027 potrzebne są inwestycje w ramach Krajowego Programu Oczyszczania Ścieków Komunalnych, w celu wdrożenia dyrektywy dotyczącej oczyszczania ścieków komunalnych. Są one szacowane na ponad 26 mld PLN. Wynika to z faktu, że np. 167 aglomeracji powyżej 15 tys. mieszkańców w Polsce nie spełnia wymagań dyrektywy [7]. Jest to jednak niewielka część całkowitych wydatków związanych z tworzeniem, utrzymaniem i cyklicznymi konserwacjami infrastruktury gospodarki wodno-ściekowej.

W związku ze zwiększającymi się „obciążeniami chemicznymi i fizycznymi” na konstrukcje zbiorników żelbetowych, wzrastają też wskaźniki niepowodzenia naprawczych projektów budowlanych, których realizacja zakończyła się gorszym wynikiem od oczekiwanego. Niepowodzenie realizacji tych projektów budowlanych przypisuje się wielu czynnikom, takim jak niski poziom ekspertyz technicznych poprzedzających remont, brak doświadczenia projektantów opracowujących naprawy; wybór nieodpowiedniego wykonawcy prac, przede wszystkim w wyniku zastosowania kryterium najniższej ceny. Pomija się także najczęściej całościową ocenę ryzyka inwestycji na poziomie kosztów, czasu i jakości realizacji prac remontowych oraz pełnego zakresu wykonania zaplanowanych czynności budowlanych. Okres pomiędzy kolejnymi naprawami uszkodzonych powierzchni użytkowanych zbiorników w oczyszczalniach ścieków ulega od kilkudziesięciu lat stałemu skróceniu (czas pomiędzy remontami stał się znacznie krótszy niż oczekiwany). Zasadniczym czynnikiem powodującym przyspieszone uszkodzenie powłok ochronnych jest stale zwiększające się stężenie szkodliwych czynników chemicznych w ściekach, spowodowane coraz mniejszym zużyciem wody i coraz większą ilością tzw. chemii w systemach produkcyjnych. Z wymienionych powodów powierzchnie betonowych ścian i den zbiorników wymagają coraz lepszej ochrony.

Czynniki sprzyjające awariom i nieskuteczności wykonywanych napraw

Spośród wielu przyczyn awarii powłok ochronnych [1, 10] najważniejsze są:

- nieprzygotowane podłoże pod aplikację, nieznajomość wymagań dotyczących podłoża betonowego, nadmierne zawilgocone podłoże;
- niedostosowanie rodzaju aplikowanego polimocznika do warunków środowiska, w którym pracuje powłoka;
- zwiększające się szkodliwe oddziaływania, np. chemiczne, na aplikowane powłoki;
- wartości parametrów technicznych podłoża betonowego oraz fizyczne i chemiczne właściwości polimocznika i warunki środowiskowe podczas aplikacji;

- increasing harmful effects, e.g., chemical, on applied coatings;
- the technical parameters of the concrete substrate, the physical and chemical properties of polyurea, and the environmental conditions during application;
- increasing user expectations regarding protective coatings, such as: color and surface texture stability; significant crack-bridging properties; resistance to impact, thermal, dynamic loads, and aging of materials; ensuring long-term compatibility with the substrate, etc.;
- an unsuitable, inexperienced contractor with inadequately prepared equipment, selected based on simplified bid selection criteria reduced to the lowest price;
- a constant tendency to minimize costs, shorten application time, and overstate the quality of the work performed;
- lack of initial, comprehensive diagnostics of the technical condition of the tank surface being repaired;
- incorrect selection of the designer developing the repair technology and choosing an inappropriate renovation technology;
- lack of comprehensive risk analysis in the design and execution of tank renovations.

Technical requirements that must be met when applying polyurea coatings

Technical requirements for concrete substrates. Polyurea, as an insulating coating that reinforces the substrate, is applied to substrates such as concrete, steel, wood, geotextiles, bituminous underlayments, plywood, glass, reinforced plastic, iron, non-ferrous metals, PVC, EPDM, and resin coatings. Generally, the concrete surface to be repaired should be stable, clean, dry, dust-free, even and smooth, free of cracks, non-corroded, homogeneous, and free of adhesion-impairing substances, such as oil, grease, or layers of cement slurry. The concrete should have the required compressive strength and peel strength, as well as abrasion, impact, and rapid temperature changes.

Environmental requirements during application. The ambient temperature, including the substrate temperature, should not be too low or too high during application; ideally, 5–35°C. Furthermore, windless weather, relative air humidity no higher than 90%, and concrete surface moisture content less than 4% are required (the substrate should be isolated from sources of constant moisture). Technical specifications for polyurea. Polyurea extends the durability of structures by protecting them against the increasing threat of corrosion. It protects concrete and steel from degradation, strengthens the surface of components, and is resistant to static and dynamic loads such as impact, abrasion, aging, shrinkage, scratching, exposure to harmful substances, long-term exposure to water, low and high temperatures, and short-term temperature fluctuations from $T_{\min} = -45^{\circ}\text{C}$ to $T_{\max} = 180^{\circ}\text{C}$.

Polyurea should: have high tensile and tear strength; be flexible yet rigid, waterproof; have excellent crack-bridging properties; be suitably rough yet smooth; be environmental-

- coraz większe oczekiwania użytkownika dotyczące powłok ochronnych, jak np.: stałość koloru i faktury powierzchni; znaczne zdolności mostkowania rys; odporność na obciążenia udarowe, termiczna, dynamiczna oraz na starzenie się materiałów; zapewnienie długoterminowej współpracy z podłożem itp.;
- nieodpowiedni, niedoświadczony wykonawca dysponujący nieodpowiednio przygotowanym oprzyrządowaniem, wyłoniony w wyniku uproszczonych kryteriów wyboru ofert sprowadzonych do najniższej ceny;
- stała tendencja do minimalizowania kosztów, skracanie czasu aplikacji i zaniżanie jakości wykonanej pracy;
- brak wstępnej, pełnej diagnostyki stanu technicznego naprawianej powierzchni zbiornika;
- niewłaściwy wybór projektanta opracowującego technologie naprawy i wybór nieodpowiedniej technologii renowacji;
- brak całościowej analizy ryzyka w procesie projektowania i wykonawstwa renowacji zbiorników.

Warunki techniczne, jakie powinny być spełnione podczas aplikacji powłok polimocznikowych

Warunki techniczne dotyczące podłoża betonowego. Polimocznik, jako powłoka izolacyjna wzmacniająca podłoże, jest aplikowany na podłoża, takie jak beton, stal, drewno, geowłókniny, podkłady bitumiczne, sklejka, szkło, zbrojony plastik, żelazo, metale nieżelazne, PVC, EPDM, powłoki żywiczne. Z zasady naprawiana powierzchnia betonowa powinna być stabilna, czysta, sucha, bezpyłowa, równa – wygładzona, bez rys, nieskorodowana, jednorodna, wolna od substancji osłabiających przyczepność, np. oleju lub smaru czy warstw zaczynu cementowego. Beton powinien mieć wymaganą wytrzymałość na ściskanie oraz na odrywanie od podłoża, a także odporność na ścieranie, udarową i na gwałtowne zmiany temperatury.

Wymagania środowiskowe podczas aplikacji. Temperatura otoczenia, a także podłoża podczas aplikacji nie powinna być za niska i za wysoka, optymalnie 5–35°C. Ponadto wymagana jest bezwietrzna pogoda, wilgotność względna powietrza nie więcej niż 90% oraz wilgotność powierzchni betonowej mniejsza niż 4% (podłoże powinno być izolowane od źródła stałego zawilgocenia).

Warunki techniczne dotyczące polimocznika. Polimocznik przedłuża okres trwałości konstrukcji, zabezpieczając ją przed zwiększającym się zagrożeniem korozyjnym, chroni beton i stal przed degradacją, wzmacnia powierzchnię elementów, jest odporny na obciążenia statyczne i dynamiczne, takie jak uderzenie, ścieranie, starzenie, skurcz, zarysowanie, oddziaływanie szkodliwymi substancjami, długotrwałe obciążenie wodą oraz niską i wysoką temperaturą, a także krótkotrwałe skoki temperatury $T_{\min} = -45^{\circ}\text{C}$ do $T_{\max} = 180^{\circ}\text{C}$.

Polimocznik powinien: charakteryzować się dużą wytrzymałością na rozciąganie i rozdarcie; być elastyczny, a jednocześnie sztywny, wodoodporny; mieć bardzo dobre właściwości mostkowania rys; być odpowiednio szorstki, a jednak odpowiednio gładki, przyjazny, nieszkodliwy i niezanieczyszczający środowiska, stosowalny w przypadkach wymaganej higieny, akceptowany przez organizmy żywe od małych po duże. Polimocz-



ly friendly, harmless, and non-polluting; be suitable for use where hygiene is required; and be acceptable to living organisms from small to large.

Polyurea should be applied without gaps or expansion joints, covering entire flat and curved surfaces without unnecessary seams. Additionally, it should be UV-resistant, relatively inexpensive to apply, and predictable in use. Long-term resistance to organic acids, low water absorption, and resistance to biogenic chemical reactions are expected. Polyurea is used for floor surfaces, as insulation in pipelines, tanks, bridges, etc.

Conditions for the contractor. If ideal contractors existed, with reliable equipment and experienced personnel, if a disciplined work schedule could be maintained, and if the financial liquidity of the contractor, investor, and entities involved in the project was ensured, the risk of failure to meet the planned quality, completion time, full investment scope, and costs would be very low. While the contractor market includes companies with good reputations, there are also companies that, for various reasons, fail, i.e., exceed the completion time and fail to meet the planned quality of work [11].

Examples of tank renovation failures using polyurea coatings: Reinforced concrete tanks in a large city's wastewater treatment plant

Reinforced concrete municipal wastewater tanks (photo 1) have been repaired multiple times. The main reasons for failure include:

- lack of a thorough initial technical diagnosis;
- uninsulated and persistently damp walls and bottoms, which initiated osmosis and water diffusion under the polyurea coating;
- unprotected cracks and expansion joints (photo 1) against rainwater and groundwater ingress;
- inexperienced contractor and incorrectly selected polyurea type;
- subsequent repairs carried out using the same uncorrected technology. The substrate for polyurea application did not meet the requirements for moisture, cleanliness, uniformity, and strength (photo 2). After the first two repairs, osmotic bubbles appeared on the walls and bottoms of the tanks within a few weeks (photo 3). The source of the liquid with high chloride and dust concentrations on the substrate was heavy dust during the repair work, while the source of the water was the damp concrete substrate.

The semi-permeable coating was a mineral primer, while the imperme-

nik należy aplikować bez przerw, dylatacji, pokrywać nim całe powierzchnie płaskie i zakrzywione bez zbędnych szwów. Dodatkowo powinien być odporny na promieniowanie UV, dość tani w aplikacji i przewidywalny w użytkowaniu. Oczekuje się długotrwałej odporności na kwasy organiczne, małej nasiąkliwości, odporności na biogenne reakcje chemiczne. Polimocznik stosowany jest na powierzchnie posadzek, jako izolacja w rurociągach, w zbiornikach, mostach itp.

Warunki dotyczące wykonawcy. Gdyby istniały idealne firmy wykonawcze dysponujące niezawodnym sprzętem i doświadczonym personelem, gdyby można było utrzymać w dyscyplinie harmonogram prac oraz mieć zapewnianą płynność finansową wykonawcy, inwestora i podmiotów włączonych w inwestycję, to ryzyko niedotrzymania projektowanej jakości, czasu wykonania, pełnego zakresu inwestycji i kosztów, byłoby bardzo małe. Na rynku wykonawców są firmy o dobrej reputacji, ale także firmy, które z różnych przyczyn zawodzą, tzn. przekraczają czas realizacji i nie dotrzymują projektowanej jakości robót [11].

Przykłady niepowodzeń w renowacji zbiorników przy użyciu powłok polimocznikowych

Zbiorniki żelbetowe w oczyszczalni ścieków dużego miasta. Żelbetowe zbiorniki na ścieki komunalne (fotografia 1) były naprawiane wielokrotnie. Główne przyczyny niepowodzenia to:

- brak dogłębnej wstępnej diagnozy technicznej;
- niezaizolowane przeciwwilgociowo i stale zawilgocone ściany oraz dna inicjujące osmozę i dyfuzję wody pod powłoką polimocznika;
- niezabezpieczone pęknięcia i dylatacje (fotografia 1) przed wnikaniem wód opadowych oraz gruntowych;
- niedoświadczony wykonawca i nieodpowiednio dobrany rodzaj polimocznika;
- kolejne naprawy przeprowadzone wg tej samej nieskorygowanej technologii.

Podłoże pod aplikację polimocznika nie spełniało wymagań pod względem wilgotności, czystości, jednorodności i wytrzymałości (fotografia 2). Po dwóch pierwszych naprawach, w okresie kilku tygodni, pojawiły się pęcherze osmotyczne na ścianach i dnach zbiorników (fotografia 3). Źródłem powstania cieczy o dużym stężeniu chlorków i pyłów lokalizujących się na podkładzie było duże zapylenie podczas prac naprawczych, a źródłem wody – zawilgocone podłoże betonowe. Powłokę półprzepuszczalną stanowił podkład mineralny, a powłokę nieprzepuszczalną polimocznik (4 elementy konieczne do powstania osmozy [3, 4]).



Photo 1. Municipal sewage tank during the third repair of the protective coating

Fot. 1. Zbiornik na ścieki komunalne w trakcie trzeciej naprawy powłoki ochronnej

able coating was polyurea (four elements necessary for osmosis [3, 4]).

After the first repair and the appearance of osmotic and diffusion bubbles, the contractor attempted to repair the surface by removing the bubbles and replacing them with polyurea with good strength and chemical properties. However, a lack of care and knowledge of protective coating application techniques resulted in the reappearance of osmotic bubbles after this repair (photo 4). Inactive and inexperienced project supervision led to very serious tank failures, taking them out of service for a long time, complicating the operation of the wastewater treatment plant. The final, successful repair was preceded by a good diagnosis, a well-se-

Po pierwszej naprawie i pojawieniu się pęcherzy osmotycznych oraz dyfuzyjnych wykonawca starał się naprawiać powierzchnię przez usuwanie pęcherzy i położenie w ich miejsce ponownie polimocznika o dobrych parametrach wytrzymałościowych i chemicznych. Brak staranności i wiedzy dotyczącej techniki aplikacji powłok ochronnych sprawiły jednak, że po tej naprawie powtórnie pojawiły się pęcherze osmotyczne (fotografia 4). Nieaktywny i mało doświadczony nadzór inwestorski doprowadził do bardzo poważnych awarii zbiorników, wyłączających je na długi czas z użytkowania, co skomplikowało funkcjonowanie oczyszczalni ścieków. Ostateczna naprawa, zakończona sukcesem, była poprzedzona dobrą diagnozą, dobrze dobranym materiałem naprawczym w technologii



Photo 2. Multiple layers of polyurea and a poorly constructed concrete substrate
Fot. 2. Wiele warstw polimocznika i niedbale wykonane podłoże betonowe



Photo 3. Osmotic bubbles in the tank's bottom plate
Fot. 3. Pęcherze osmotyczne w płycie dennej zbiornika



Photo 4. Numerous osmotic bubbles on the tank surface
Fot. 4. Liczne pęcherze osmotyczne na powierzchni zbiornika

lected repair material using Xolutec® technology, and the employment of a proven contractor.

Industrial wastewater tank at a large paper product manufacturing plant. A similar polyurea failure occurred in a tank for industrial wastewater containing strong acids. The coating flaked, scratched, and cracked. Numerous defects appeared on the surface, causing the coating to lose its physicochemical and physical properties, discoloration, and separation from the substrate due to osmotic bubbles (photos 5÷7). Photo 7 shows the effects of deepening perforation of the coating, loss of elasticity, and strength. In this case, the main causes of the failure were a lack of diagnosis of the tank's technical condition, a poorly prepared application design, and an inappropriately selected type of polyurea, which was not resistant to the changing chemical composition of wastewater. The resulting osmosis effectively separated the concrete cover from the subfloor and the subfloor from the polyurea.

Swimming pools. Repeated failures of polyurea coatings applied to concrete surfaces in swimming pools were caused by workmanship errors, including defects in the coating's connection to the technological elements of gutters, troughs,

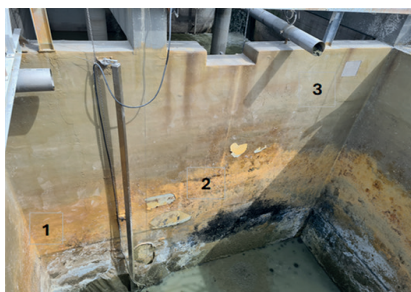


Photo 5. Damage to the polyurea coating at the tank level: 1 – osmotic bubbles; 2 – defects, discoloration, peeling, and scratching of the coating; 3 – undamaged coating above the wastewater surface
Fot. 5. Uszkodzenie powłoki polimocznika na wysokości zbiornika: 1 – pęcherze osmotyczne; 2 – ubytki; odbarwienie, złuszczenie, zarysowanie powłoki; 3 – nieuszkodzona powłoka powyżej powierzchni ścieków

Xolutec® oraz zatrudnieniem sprawdzonego wykonawcy.

Zbiornik na ścieki przemysłowe przy dużym przedsiębiorstwie produkcji wyrobów papierowych. Podobna awaria polimocznika miała miejsce w zbiorniku na ścieki przemysłowe, zawierające silne kwasy. Powłoka uległa złuszczeniu, zarysowaniu i pęknięciom. Na powierzchni pojawiły się liczne ubytki powłoki, która utraciła właściwości fizykochemiczne i fizyczne oraz uległa odbarwieniu i odpowieniu od podłoża wskutek powstania pęcherzy osmotycznych (fotografie 5÷7). Na fotografii 7 pokazano skutki pogłębiającej się perforacji powłoki, utratę elastyczności i wytrzymałości. W tym przypadku główną przyczyną zaistniałej awarii był brak

diagnozy stanu technicznego zbiornika, źle sporządzony projekt technologiczny aplikacji, a w tym nieodpowiednio dobrany rodzaj polimocznika nieodpornego na zmieniający się skład chemiczny ścieków. Powstająca osmoza skutecznie rozdzieliła otulinę betonową od podkładu i podkład od polimocznika.

Baseny kąpielowe. Powodem powtarzających się uszkodzeń powłoki polimocznikowej aplikowanej na powierzchnie betonowe w basenach kąpielowych były błędy wykonawcze, m.in. usterki w połączeniu powłoki z elementami technologicznymi instalacji rynien, korytek, dysz technologicznych itp., skutku-



technological nozzles, etc., resulting in water penetration under the polyurea coating. In many places, the coating thickness was insufficient, gaps, and workmanship defects caused small air bubbles in the coating, creating a perforated, semi-permeable coating that initiated osmosis. These defects led to the formation of diffusion and osmotic bubbles and the detachment of entire polyurea surfaces (photos 8 and 9). In areas exposed to sunlight, damage to the UV layer and numerous discolorations occurred. An attempt to repair the coating by locally “patching” the coatings did not yield the expected results, and after several seasons, they also began to degrade. Another example of failure was an open-air swimming pool. The UV-resistant top layer, part of the multi-composite protective polyurea coating, was peeling despite numerous repairs (photo 10). This was due to the surface layer’s incompatibility with chlorinated water, which was losing its elasticity, hardness, etc. Furthermore, the repair was carried out during the summer months, during a period of high temperatures, which caused the rapid loss of volatile substances, resulting in the top layer not adhering to the substrate.

The main reasons for the failure of polyurea coatings to the concrete surfaces shown in the swimming pools were primarily excessive substrate moisture, an unsuitable contractor, a lack of preliminary diagnosis and proper technological design, a failure to understand

jące penetracją wody pod powłokę polimocznikową. W wielu miejscach była zbyt mała grubość powłoki, ubytki oraz wywołane wadami wykonawczymi drobne pęcherze powietrza w powłoce, tworzące miejscami powłokę perforowaną, czyli półprzepuszczalną inicjującą osmozę. Te usterki doprowadziły do powstania pęcherzy dyfuzyjnych i osmotycznych oraz odspojenia całych powierzchni polimocznika. (fotografie 8 i 9). W miejscach ekspozycyjnych na promienie słoneczne nastąpiło uszkodzenie warstwy UV i liczne odbarwienia. Próba naprawy powłoki polegająca na miejscowym „łataniu” powłok nie przyniosła spodziewanych rezultatów, i po kilku sezonach one także ulegały degradacji.

Innym przykładem awarii był otwarty basen kąpielowy. Wierzchnia warstwa odporna na oddziaływanie promieni UV, część wielokompozytowej ochronnej powłoki polimocznikowej ulegała złuszczeniu mimo licznych napraw (fotografia 10). Przyczyną było niedostosowanie tej warstwy wierzchniej, tracącej elastyczność, twardość itp., do środowiska wody chlorowanej. Ponadto naprawę przeprowadzono w miesiącach letnich, w porze wysokiej temperatury, powodującej zbyt szybką utratę substancji lotnych skutkujących „niedoklejeniem” warstwy wierzchniej do podkładu.

Główne przyczyny niepowodzenia aplikacji powłok polimocznikowych na przedstawionych powierzchniach betonowych w basenach, to przede wszystkim nadmierna wilgotność podłoża, nieodpowiedni wykonawca, brak wstępnej



Photo 6. Tensile tests: a) sample no. 3, without changes in polyurea properties; b) and c) samples from below the wastewater surface, with clear signs of damage to the polyurea structure

Fot. 6. Próbkę poddane rozciąganiu: a) próbka nr 3 bez zmian właściwości polimocznika; b) i c) próbki spod powierzchni ścieków z wyraźnymi śladami zniszczenia struktury polimocznika



Photo 7. Clear separation of the polyurea from the concrete surface, separation of the primer from the concrete base, and separation of the polyurea from the primer

Fot. 7. Wyraźne oddzielenie polimocznika od powierzchni betonowej, oddzielanie primera od podkładu betonowego i polimocznika od primera

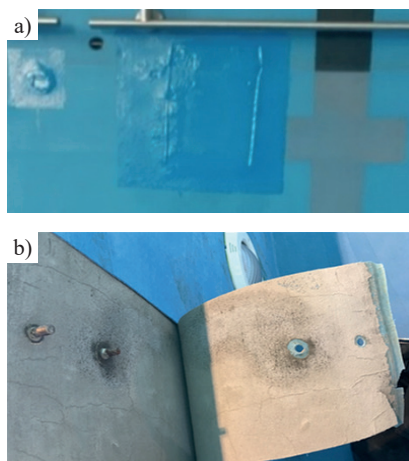


Photo 8. Re-applied polyurea layer on the detached coatings (a); removed damaged polyurea coatings in places of numerous detachments (b)

Fot. 8. Powtórnie aplikowana warstwa polimocznika na odspojone powłoki (a); usunięte uszkodzone powłoki polimocznikowe w miejscach licznych odspojień (b)

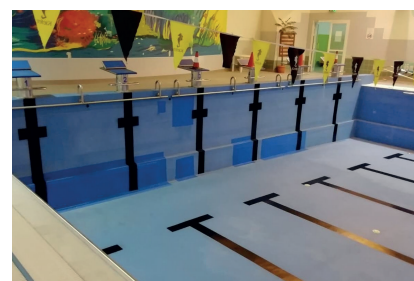


Photo 9. Multiple repairs to damaged swimming pool surfaces

Fot. 9. Kilkakrotna naprawa uszkodzonych powierzchni basenu kąpielowego



Photo 10. Damaged UV protective layer on an outdoor swimming pool

Fot. 10. Uszkodzona warstwa ochronna UV na basenie kąpielowym otwartym

the technical conditions prevailing in the swimming pools during the work, insufficient time allocated for the repair, and an inappropriate completion date.

Swimming pool water treatment tanks. An example of the loss of durability of polyurea coatings, resistant to many chemically aggressive substances, is provided by dozens of reinforced concrete pool water treatment tanks in one of Poland's popular water parks. After several years of operation, osmotic bubbles appeared like mushrooms after rain. Laboratory tests revealed a loss of elasticity, strength, and hardness, as well as surface perforation of the coating, which changed it from tight to semi-permeable, which was sufficient to trigger the osmosis process. The cause of the failure was the use of ozonation during the water treatment process. This, combined with chlorine and other bactericidal substances, created the so-called Molotov cocktail – a mixture of chlorine and ozone, which is chemically aggressive and damages the polyurea coating through a biochemical process called oxidative deamination. The reason for the loss of durability of the coating was the lack of assessment of the chemical exposure environment in the tanks. Restoring effective protection of the concrete surface involved the application of a resistant coating, including: Xolutec® technology.

The wall surface of a large research laboratory was subjected to repeated osmosis and diffusion processes. An example of errors in technological and construction designs is the protective coatings applied to the walls and ceiling of a reinforced concrete laboratory building with open windows, exposed to outdoor weather conditions. The coatings were designed to allow moisture in the ceilings and walls to diffuse outward after the concrete was poured, and moisture penetrating from the room towards the concrete could dry quickly. The paint coatings, including the primers, were semi-permeable, and a mineral primer was used as a substantial leveling layer on the walls and concrete ceiling. This created an environment conducive to diffusion and osmosis.

As a result of the moisture accumulating in the laboratory rooms and condensing on cold surfaces, the osmosis process was triggered, resulting in blisters forming under the paint coatings. On warm, dry days, the water from the blisters diffused outward (photo 11). Large areas of protective coatings on walls and ceilings were damaged in this way. The main causes of this failure include: a lack of a comprehensive approach to project execution; the preparation of a sound technological design and ongoing investor supervision; the selection of a contractor who lacked the appropriate experience and failed to address the design error; and the short implementation time and underestimated financing.



Photo 11. Concrete surface covered with osmotic-diffusion bubbles

Fot. 11. Powierzchnia betonowa pokryta pęcherzami osmotyczno-dyfuzyjnymi

diagnozy i poprawnego projektu technologicznego oraz nierozpoznanie warunków technicznych panujących na basenach w trakcie wykonania prac, zbyt krótki czas przeznaczony na realizację naprawy i niewłaściwy czas jej realizacji.

Zbiorniki uzdatniania wody basenowej. Przykładem utraty trwałości powłoki polimocznikowej, odpornej na wiele substancji agresywnych chemicznie, jest kilkadziesiąt zbiorników żelbetowych uzdatniania wody basenowej w jednym z popularnych parków wodnych w Polsce. Po kilku latach eksploatacji, jak grzyby po deszczu pojawiły się pęcherze osmotyczne. Badania laboratoryjne wykazały utratę elastyczności, wytrzymałości i twardości oraz powierzchniową perforację powłoki, wskutek czego zmieniła się ze szczelnej na półprzepuszczalną, co wystarczyło, by uruchomić proces osmozy. Przyczyną awarii było użycie ozonowania w procesie uzdatniania wody, co w połączeniu z chlorem i innymi bakteriobójczymi substancjami stworzyło tzw. koktajl Mołotowa, czyli mieszaninę chloru i ozonu, która jest agresywna chemicznie i uszkadza powłokę polimocznika w drodze procesu biochemicznego zwanego delaminacją oksydacyjną. Powodem utraty trwałości powłoki był brak oceny środowiska oddziaływania chemicznego, jakie panowało w zbiornikach. Odtworzenie skutecznej ochrony powierzchni betonu polegało na zastosowaniu odpornej powłoki, m.in. w technologii Xolutec®.

Powierzchnia ściany dużego laboratorium badawczego poddana wielokrotnym procesom osmozy i dyfuzji. Przykładem błędów w projektach technologicznych i wykonawczych mogą być powłoki ochronne aplikowane na ściany i strop żelbetowego budynku laboratorium z otwartymi oknami, ekspozowane na zewnętrzne warunki atmosferyczne. Powłoki zaprojektowano tak, aby wilgoć w stropach i ścianach po wylaniu betonu mogła dyfundować na zewnątrz, a wilgoć penetrująca z pomieszczenia w kierunku betonu mogła szybko wysychać. Powłoki malarskie, łącznie z podkładami, były półprzepuszczalne, a warstwą wyrównawczą położoną na ścianach i stropie betonowym o znacznej grubości był podkład mineralny. Stworzono zatem środowisko sprzyjające dyfuzji i osmozie. Wskutek gromadzącej się wilgoci w pomieszczeniach laboratorium i wykraplania się jej na zimnych powierzchniach uruchomiony został proces osmozy, w wyniku którego powstały pęcherze pod powłokami malarskimi. W dniach ciepłych i suchych z kolei woda z pęcherzy dyfundowała na zewnątrz (fotografia 11). Duże powierzchnie powłok ochronnych na ścianach i stropach uległy w ten sposób uszkodzeniu.

Główne przyczyny tej awarii to: brak kompleksowego podejścia do wykonania inwestycji; sporządzenia dobrego projektu technologicznego oraz stałego nadzoru inwestorskiego; dobór wykonawcy, który nie posiadał odpowiedniego doświadczenia i nie zarządził błędowi projektowemu oraz zbyt krótki czas realizacji i zaniżenie kwoty finansowania.

Główne przyczyny tej awarii to: brak kompleksowego podejścia do wykonania inwestycji; sporządzenia dobrego projektu technologicznego oraz stałego nadzoru inwestorskiego; dobór wykonawcy, który nie posiadał odpowiedniego doświadczenia i nie zarządził błędowi projektowemu oraz zbyt krótki czas realizacji i zaniżenie kwoty finansowania.



Summary and Conclusions

The most common causes of polyurea coatings detaching from the walls and floors of reinforced concrete tanks are improperly prepared substrates. Substrates characterized by excessive moisture, high dust levels, and low strength, as well as those applied over moisture-impermeable primers or polyurea coatings, are susceptible to “blistering” caused by diffusion or osmosis. Prevention of such failures should be based on a diagnosis (technical expertise) at the beginning of the technological design process, and the selection of appropriate repair materials and a properly trained, proven contractor. A comprehensive approach to the correctness of the implementation of the discussed applications requires the use of a risk analysis of the undertaken repair actions, including the costs, quality and time of repairing damaged protective coatings [11].

Photo. M. Maj

Received: 18.03.2025

Revised: 13.05.2025

Published: 19.09.2025

Podsumowanie i wnioski

Najczęstszymi przyczynami odspojenia powłok polimocznikowych od ścian i den zbiorników żelbetowych jest źle przygotowane podłoże. Podłoża odznaczające się nadmierną wilgotnością, dużym zapyleniem i małą wytrzymałością oraz aplikowane na nieprzepuszczające wilgoć powłoki podkładowe lub polimocznikowe są podatne na „pecherzowanie” wywołane dyfuzją lub osmozą. Zapobieganie takim awariom powinno się odbywać podczas diagnozy (ekspertyzy technicznej) na początku przygotowania projektu technologicznego oraz wyboru odpowiednich materiałów naprawczych i właściwie przygotowanego, sprawdzonego wykonawcy.

Kompleksowe ujęcie poprawności wykonania omawianych aplikacji wymaga zastosowania analizy ryzyka podejmowanych działań naprawczych, obejmującej koszty, jakość i czas naprawy uszkodzonych powłok ochronnych [11].

Fot. M. Maj

Artykuł wpłynął do redakcji: 18.03.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 13.05.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

- [1] Banera J, Maj M. Reasons for lack of adhesion of polyurea coatings to concrete substrates in chemically aggressive water tanks. *Materiały Budowlane* 2024; 1(12): 25–31; <https://doi.org/10.15199/33.2024.12.03>.
- [2] Machen JD. Common Causes of Blistering and Bubbling in Industrial Coatings. KTA-Tator, 12 July 2016; kta.com/kta-university/blistering-bubbling-coatings.
- [3] Finch G, Hubbs B, Bambino R. Osmosis and the Blistering of Polyurethane Waterproofing Membranes, In *Proceedings of the 12th Canadian Conference on Building Science and Technology*, Montreal, Quebec, Canada, May 2009; www.brikbases.org/sites/default/files/best2_hubbs_finch.pdf.
- [4] Finch G, Hubbs B, Bambino R, Osmosis and the Blistering of Liquid Applied Polyurethane Roof Membranes, PE RDH Building Engineering Ltd. Vancouver, BC BEST2 Portland April 2010; https://cdn.ymaws.com/www.nibs.org/resource/resmgr/BEST/BEST2_WB11-1.pdf.
- [5] Directive (EU) 2024/3019 Of The European Parliament And Of The Council of 27 November 2024, concerning urban wastewater treatment, publication 12.12.2024.
- [6] Büttner O, Jawitz JW, Birk S, Borchardt D. Why Wastewater Treatment Fails to Protect Stream Ecosystems in Europe. *Water Research* 2022, 217, 118382; <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118382>.
- [7] Dyrektywa 91/271/EWG, Dyrektywa Rady z 21 maja 1991 r. dotycząca oczyszczania ścieków komunalnych (Dz.U.UE L z 30 maja 1991 r.).
- [8] Opracowanie własne na podstawie publikacji Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – Instytucji Wdrażającej Program Operacyjny Infrastruktura i Środowisko.
- [9] Fundusze Europejskie na Infrastrukturę, Klimat, Środowisko 2021–2027, Ministerstwo Europejskie na Infrastrukturę, Klimat, Środowisko 2012–2027.
- [10] Maj M, Ubysz A. The reasons for the loss of polyurea coatings adhesion to the concrete substrate in chemically aggressive water tanks, *Engineering Failure Analysis* 2022, 142, 106774; <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106774>.
- [11] Piertras P, Szmit M. Zarządzanie projektem – wybrane metody i techniki. Oficyna Księgarsko-Wydawnicza „Horyzont”. Łódź 2003.