

mgr inż. Damian Wojda¹⁾
ORCID: 0000-0002-8043-5113

Comparison of the paint coating system properties on substrate prepared by laser ablation or abrasive blasting

Porównanie właściwości systemu malarskiego na podłożu przygotowanym przez ablację laserową lub czyszczenie strumieniowo-ściernie

DOI: 10.15199/33.2025.10.06

Abstract. This paper presents a comparison of the paint coatings system properties on substrate prepared by abrasive blasting or laser ablation. The tests of coatings included adhesion, corrosion, impedance, and microscopic analysis. High adhesion values were found in both methods, but the substrate after ablation showed greater corrosion around the scribe. Nevertheless, this method, after appropriate refinement, shows promise for use in anti-corrosion work, especially considering its economic and ecological advantages.

Keywords: coatings; laser ablation; surface preparation.

Streszczenie. W artykule przedstawiono porównanie właściwości systemu malarskiego na dwóch różnie przygotowanych stalowych podłożach: przez obróbkę strumieniowo-ścierną i ablację laserową. Badania powłok obejmowały adhezję, skorodowanie, impedancję i analizę mikroskopową. Stwierdzono duże wartości adhezji w obu metodach, lecz podłoże po ablacji było bardziej skorodowane wokół rysy. Jednak metoda ta, po odpowiednim dopracowaniu, rokuje na zastosowanie w pracach antykorozyjnych, szczególnie rozpatrując jej zalety ekonomiczne i ekologiczne.

Słowa kluczowe: powłoki; ablacja laserowa; przygotowanie podłoża.

Carbon steel is one of the most commonly used construction materials, mainly due to its beneficial strength properties. However, a significant limitation of carbon steel generally in aggressive environments, e.g. industrial areas or areas surrounding road infrastructure (e.g. bridges, energy-absorbing barriers, noise barriers). Steel corrosion is a natural electrochemical process in which metal reacts with environmental factors, leading to gradual degradation of its structure, loss of mass and deterioration of mechanical properties. This phenomenon is characterised by relatively high dynamics and, as a consequence, contributes to significant technical, economic and social damage. According to estimates, the economic cost of corrosion is estimated at 3 – 5% of GDP [1]. On a global scale, this means billions of dollars in losses annually. Emergency damage to structural elements of critical infrastructure can lead to threats to public safety, including traffic accidents and failures of energy or industrial infrastructure, and even disasters. They result not only in threats to human health and life, but also in disruptions to the basic functioning of society, mobility difficulties and limited access to basic services. In addition, the long-term consequences of corrosion, such as the degradation of urban and transport infrastructure, contribute to a deterioration in the quality of life of residents and increase the costs incurred by local communities and the state. Therefore, in order to extend the service life of steel, various methods of protection are used, most often in the form of coating materials. There

stal węglowa jest jednym z najpowszechniej wykorzystywanych materiałów konstrukcyjnych, co wynika przede wszystkim z jej korzystnych właściwości wytrzymałościowych. Jednak istotnym ograniczeniem tego materiału jest jego podatność na procesy korozyjne, szczególnie w środowisku agresywnym, np. obszary przemysłowe czy okolice infrastruktury drogowej (np. mosty, barierę energochłonne, ekrany przeciwhałasowe). Zjawisko korozji stali jest naturalnym procesem elektrochemicznym, w którym metal reaguje z czynnikami środowiskowymi, prowadząc do stopniowej degradacji struktury, utraty jego masy i pogorszenia właściwości mechanicznych. Zjawisko to charakteryzuje się stosunkowo dużą dynamiką i w konsekwencji przyczynia się do znacznych zniszczeń zarówno technicznych, ekonomicznych, jak i społecznych. Zgodnie z szacunkami, ekonomiczny koszt korozji jest szacowany na 3 – 5% PKB [1]. W globalnej skali oznacza to miliardy dolarów strat rocznie. Awaryjne uszkodzenia elementów konstrukcyjnych infrastruktury nie tylko krytycznej mogą prowadzić do zagrożeń dla bezpieczeństwa publicznego, w tym wypadków komunikacyjnych oraz awarii infrastruktury energetycznej czy przemysłowej, a nawet katastrof. Skutkują one nie tylko zagrożeniem zdrowia i życia ludzi, ale także zakłóceniami w podstawowym funkcjonowaniu społeczeństwa, utrudnieniami w mobilności oraz ograniczeniem dostępu do podstawowych usług. Ponadto długotrwałe konsekwencje korozji, takie jak degradacja infrastruktury miejskiej i transportowej, przyczyniają się do pogorszenia jakości życia mieszkańców oraz zwiększają koszty ponoszone przez społeczności lokalne i państwo. W związku z tym, celem wydłużenia żywotności stali stosu-

¹⁾ Instytut Badawczy Dróg i Mostów; damian.wojda@ibdim.edu.pl

are other methods, but in the case of large infrastructure, such as bridges or chemical plants, painting systems are the most popular solution due to their relatively low cost and high effectiveness. The main task of coatings is to limit the penetration of corrosive agents, including moisture, into the protected steel substrate. The effectiveness of this protection depends on several parameters. One of them is the appropriate selection of a set of materials for anti-corrosion protection, adapted to the conditions prevailing around the steel structure in question. The painting system must be selected in such a way as to take into account, among other things, local atmospheric conditions, the degree of air pollution, possible chemical influences, as well as the expected service life of the structure without the need for renovation. The process of applying the protective coating is also important, as even the best materials will not fulfil their protective function if applied incorrectly. Key factors include applying the paint to a properly prepared substrate, ensuring the correct coating thickness, maintaining the application conditions (temperature, humidity) and adhering to the curing and recoating times for each coat. The most difficult and expensive stage is preparing the substrate before applying the protective materials. Improper surface preparation is one of the main causes of premature degradation of paint coatings, which implies the need for costly renovations. In the case of steel, abrasive blasting is usually used (depending on the needs, with metallic or non-metallic abrasives, in a water shield or dry). Thanks to this, an irregular surface profile is created on the steel, ensuring adequate adhesion at the steel-coating interface. The most common requirement for steel preparation is to achieve a cleanliness class of Sa 2(1/2) in accordance with PN-EN ISO 8501-1:2008 [2] and an intermediate roughness profile (G) in accordance with PN-EN ISO 8503-2 [3]. The PN-EN ISO 8501 series of standards specifies various methods of cleaning steel before the application of coating materials, but does not take into account modern solutions that can significantly affect the performance of corrosion protection. One such new solution is the cleaning of steel using laser ablation [4 ÷ 6]. This method involves the use of a high-energy laser beam, which selectively removes corrosion products, contaminants or coatings without damaging the steel substrate (after selecting the appropriate laser settings). An additional advantage is the possibility of very precise work, which is particularly important in the case of elements with complex geometry. In specific situations, this method can bring significant economic benefits. An example is the anti-corrosion protection of box girder bridge joints. Inside the bridge box, cleaning each weld with standard abrasive blasting methods involves enormous dust generation inside, difficulty in thoroughly and selectively cleaning the weld surface and heat-affected zone, as well as a large amount of work involved in removing the used abrasive. All these disadvantages can potentially be eliminated by surface preparation using laser ablation. In addition, this technology is environmentally friendly as it does not generate waste in the form of abrasives or large amounts of dust. Performing

je się różne metody jej zabezpieczenia, najczęściej w postaci materiałów powłokowych. Istnieją też inne metody, jednak w przypadku infrastruktury o dużych rozmiarach, takich jak mosty czy zakłady chemiczne, najczęściej wybieranym rozwiązaniem są systemy malarskie ze względu na relatywnie niski koszt przy jednocześnie dużej skuteczności. Głównym zadaniem powłok jest ograniczenie przenikania do chronionego stalowego podłoża czynników korozyjnych, w tym przede wszystkim wilgoci. Skuteczność tej ochrony jest zależna od kilku parametrów. Jednym z nich jest odpowiedni dobór zestawu materiałów do zabezpieczenia antykorozyjnego dostosowany do warunków panujących wokół eksploatowanego obiektu stalowego. System malarski musi być dobrany w taki sposób, aby uwzględniał m.in. lokalne warunki atmosferyczne, stopień zanieczyszczenia powietrza, możliwe chemiczne oddziaływania, a także przewidywany czas eksploatacji konstrukcji bez konieczności przeprowadzania remontu. Ważny jest również proces wykonania zabezpieczenia powłokowego, gdyż nawet najlepsze materiały zaaplikowane w niewłaściwy sposób nie będą spełniały funkcji ochronnej. Do kluczowych czynników należą m.in. aplikacja farby na odpowiednio przygotowane podłożu, właściwa grubość powłoki, zachowanie warunków aplikacji (temperatura, wilgotność) oraz utrzymanie reżimu czasu utwardzania i przemalowania każdej z powłok. Najtrudniejszym i najdroższym etapem jest przygotowanie podłoża przed aplikacją materiałów ochronnych. Niewłaściwe przygotowanie powierzchni jest jedną z głównych przyczyn przedwczesnej degradacji powłok malarskich, co implikuje konieczność wykonania kosztownych renowacji. W przypadku stali zwykle stosuje się czyszczenie strumieniowo-ściernie (w zależności od potrzeb ścierniwem metalicznym lub niemetalicznym, w osłonie wodnej lub na sucho). Dzięki temu na stali tworzy się nieregularny profil powierzchni pozwalający zapewnić odpowiednią przyczepność na granicy stal-powłoka. Najpopularniejszym wymaganiem dotyczącym przygotowania stali jest osiągnięcie klasy czystości Sa 2^{1/2} zgodnie z normą PN-EN ISO 8501-1:2008 [2] oraz profilu chropowatości pośredniego (G) zgodnie z PN-EN ISO 8503-2 [3]. Seria norm PN-EN ISO 8501 zakłada różne sposoby czyszczenia stali przed aplikacją materiałów powłokowych, jednakże nie uwzględnia nowoczesnych rozwiązań, które znacznie mogą wpłynąć na wykonanie zabezpieczenia antykorozyjnego. Jednym z takich nowych rozwiązań jest czyszczenie stali z zastosowaniem ablacji laserowej [4 ÷ 6]. Metoda ta polega na wykorzystaniu wiązki lasera o wysokiej energii, która selektywnie usuwa produkty korozji, zanieczyszczenia lub powłoki, nie uszkadzając (po dobraniu odpowiednich nastaw lasera), stalowego podłoża. Dodatkową zaletą jest możliwość bardzo precyzyjnej pracy, co jest szczególnie istotne w przypadku elementów o skomplikowanej geometrii. W specyficznych sytuacjach metoda ta może przynieść duże korzyści ekonomiczne. Przykładem może być zabezpieczanie antykorozyjne styków konstrukcji skrzynkowej mostu. Wewnątrz skrzyni mostu, czyszczenie każdej spoiny standardowymi metodami strumieniowo-ściernymi wiąże się z ogromnym zapyleniem wnętrza, trudnością dokładnego, selektywnego czyszczenia powierzchni spoiny i strefy wpływu ciepła, a także dużymi na-

laser ablation requires the selection of appropriate parameters, including power, frequency, feed rate and others [6], as well as an experienced operator. Each of these parameters should be optimised depending on the type of steel, the thickness of the scale or corrosion products, and the desired end result. However, the problem with using this method for infrastructure purposes is the law. According to the Regulation of the Minister of Infrastructure and Construction of 17 November 2016 [7], every coating material intended for the anti-corrosion protection of steel infrastructure structures must have a National Technical Assessment (KOT). At the time of writing, no product has a KOT allowing it to be used on a steel substrate prepared by laser ablation. The lack of appropriate legal regulations means that this technology is not widely used in large infrastructure facilities, despite promising laboratory and pilot test results. For this reason, there is a need to compare the properties of a paint system applied to a steel substrate prepared using a traditional method with a substrate prepared using laser ablation. The aim was to determine whether cleaning steel surfaces using laser ablation, apart from its economic advantages, also provides comparable corrosion protection durability to that of a surface prepared using traditional abrasive blasting.

Sample preparation and testing methods

Over forty samples of S235 steel with dimensions of 150 x 100 x 3 mm were prepared for testing. They were cleaned to a surface cleanliness level of A Sa 2 1/2 in accordance with PN-EN ISO 8501-1:2008 [2] and an intermediate roughness profile (acute angle profile) in accordance with PN-EN ISO 8503-2:2012 [3] using sharp-edged metal shot. The samples were then exposed to outdoor conditions for 30 days, with particular emphasis on exposure to moisture (exposure of samples in the open air near the Vistula River at the turn of March and April), so that the surface became covered with steel corrosion products. This procedure was intended to simulate the situation of leaving pre-cleaned large-size steel structure contacts, which over time, even before being protected, undergo natural corrosion processes. The surfaces of the samples were 100% covered with steel corrosion products. The corroded samples were cleaned using two methods before painting:

- the areas marked with the letter A were subjected to laser ablation. A cleaning laser with a power of 200 W, a wavelength of 1080 nm, a scanning frequency range of 100 Hz, and a pulse frequency of 25 kHz was used (the parameters were selected on the basis of technical pilot tests, and their optimisation will be carried out in subsequent stages of work);
- surfaces marked with the letter B were treated with non-metallic abrasive blasting (olivine sand) to restore the surface cleanliness to Sa 2 1/2.

Next, a two-coat paint system was applied to the samples, consisting of an epoxy primer with a dry film thickness of 180 µm

kładami pracy związanymi z usuwaniem zużytego ścierniwa. Wszystkie te wady potencjalnie może wyeliminować przygotowanie powierzchni za pomocą ablacji laserowej. Ponadto technologia ta jest przyjazna środowisku, gdyż nie generuje odpadów w postaci ścierniwa ani dużych ilości pyłów. Wykonanie ablacji laserowej wymaga doboru odpowiednich parametrów, m.in.: mocy, częstotliwości, szybkości przesuwu i innych [6] oraz doświadczonego operatora. Każdy z tych parametrów powinien być zoptymalizowany w zależności od rodzaju stali, grubości warstwy zendry lub produktów korozji oraz pożądanego efektu końcowego. Problemem z użyciem tej metody na potrzeby infrastruktury jest jednak prawo. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 17 listopada 2016 r. [7] każdy materiał powłokowy przeznaczony do zabezpieczenia antykorozyjnego konstrukcji infrastruktury stalowej musi mieć Krajową Ocenę Techniczną (KOT). W dniu pisania artykułu żaden wyrób nie posiada KOT-a dopuszczającego do stosowania go na podłoże stalowe przygotowane metodą ablacji laserowej. Brak odpowiednich regulacji prawnych powoduje, że technologia ta nie znajduje szerokiego zastosowania w przypadku dużych obiektów infrastrukturalnych, pomimo obiecujących wyników badań laboratoryjnych i pilotażowych. Z tego względu dostrzeżono potrzebę porównania właściwości systemu malarskiego nałożonego na podłoże stalowe przygotowane tradycyjną metodą z nałożonym na podłoże przygotowane metodą ablacji laserowej. Za cel postawiono określenie, czy czyszczenie powierzchni stalowej metodą ablacji laserowej, poza walorami ekonomicznymi, zapewnia również porównywalną trwałość zabezpieczenia antykorozyjnego do klasycznie przygotowanej powierzchni przez obróbkę strumieniowo-ścierną.

Przygotowanie próbek i metody badań

Do badań przygotowano ponad czterdzieści próbek ze stali S235 o wymiarach 150 x 100 x 3 mm. Zostały one oczyszczone do stopnia czystości powierzchni A Sa 2 1/2 zgodnie z PN-EN ISO 8501-1:2008 [2] i profilu chropowatości pośredniego (profil ostrokątny) zgodnie z PN-EN ISO 8503-2:2012 [3] za pomocą ostrokątnego śrutu metalicznego. Następnie próbki wystawiono na 30 dni ekspozycji w warunkach zewnętrznych, ze szczególnym uwzględnieniem narażenia na wilgoć (ekspozycja próbek pod gołym niebem w okolicy rzeki Wisły na przełomie marca i kwietnia), tak by powierzchnia pokryła się produktami korozji stali. Procedura ta miała symulować sytuację pozostawienia oczyszczonych wstępnie styków wielkogabarytowych konstrukcji stalowych, które z czasem, jeszcze przed zabezpieczeniem ich, ulegają naturalnym procesom korozji. Powierzchnie próbki w 100% zostały pokryte produktami korozji stali. Tak skorodowane próbki zostały poddane oczyszczaniu dwiema metodami przed malowaniem:

- oznaczone literą A powierzchnie poddano ablacji laserowej. Używano lasera czyszczącego o mocy 200 W, długości fali lasera 1080 nm, zakresie częstotliwości skanowania 100 Hz, częstotliwości impulsów 25 kHz (parametry zostały dobrane na podstawie technicznych prób pilotażowych, ich optymalizacja zostanie wykonana w kolejnych etapach prac);

(applied in two coats) and a polyurethane topcoat with a dry film thickness of 60 μm . The coatings were applied by hydrodynamic spraying. The coating system used had been previously tested and the results were positive. It has a National Technical Assessment for a coating system on a steel substrate prepared to Sa 2 $\frac{1}{2}$ in a C5 corrosive environment according to PN-EN ISO 12944-2:2018-02 [8] for a long service life (H) according to PN-EN ISO 12944-1:2018 [9].

The samples prepared in this way were tested in accordance with PN-EN ISO 12944-6:2018-03 [10], which specifies the requirements that must be met by paint systems used in a given corrosive environment and time. They were then subjected to ageing tests:

- in a humidity chamber in accordance with PN-EN ISO 6270-1:2018-02 [11] for 720 hours;
- in a salt chamber in accordance with PN-EN ISO 9227:2023-02, NSS test [12] for 1440 hours;
- variable cycles in accordance with Annex B PN-EN ISO 12944-6:2018-03 [10]. The test lasted 12 cycles, with each cycle consisting of three days of exposure in a chamber with UV radiation, three days of exposure in a salt chamber and one day of freezing at $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Before and after the ageing tests, adhesion was tested using the pull-off method in accordance with PN-EN ISO 4624:2023-11 [13]. After the ageing tests, the following degrees were assessed: flaking according to PN-EN ISO 4628-2:2016-03 [14], rusting according to PN-EN ISO 4628-3:2025-02 [15], cracking according to PN-EN ISO 4628-4:2016-03 [16], flaking according to PN-EN ISO 4628-5:2023-01 [17] and corrosion around a scratch (artificial damage) according to PN-EN ISO 4628-8:2013-05 [18]. Each test was repeated on three samples, and the results were given as their average.

In addition, impedance spectroscopy was performed in a three-electrode system before and after ageing tests, an analysis of the prepared steel substrate using a scanning electron microscope, and a measurement of the roughness profile (Rz and Ra parameters) of both surfaces using an interferometric optical profilometer.

Test results and analysis

The biggest challenge in testing new methods of surface preparation before painting is the adhesion of coatings to the substrate. It is a key parameter, without which the use of coatings in corrosive environments is impossible. The cited standard PN-EN ISO 12944-6:2018-03 [7] indicates that the pull-off strength, measured by the pull-off method, should be at least 5 MPa. Both types of samples, prepared by laser ablation and abrasive blasting, meet the required minimum (Table 1). The samples of series A before ageing tests and after each ageing test are characterised by greater adhesion than their counterparts prepared by abrasive blasting. This may indicate that the substrate prepared by laser ablation ensures very high adhesion of coatings.

The surface profile parameters of laser-prepared samples were approximately three times smaller than those of samples

- oznaczone literą B powierzchnie poddano obróbce strumieniowo-ścierniej za pomocą ścierniwa niemetalicznego (piasku oliwinowego) do ponownego uzyskania stopnia czystości powierzchni Sa 2 $\frac{1}{2}$.

Następnie na próbki nałożono dwupowłokowy zestaw malarski składający się z gruntującej powłoki epoksydowej o grubości suchej powłoki wynoszącej 180 μm (aplikowanej w dwóch przejściach) oraz poliuretanowej powłoki nawierzchniowej o grubości suchej powłoki – 60 μm . Powłoki naniesiono metodą natrysku hydrodynamicznego. Zastosowany system malarski był wcześniej badany, a wyniki oceniono pozytywnie. Posiada on Krajową Ocenę Techniczną dotyczącą systemu malarskiego na podłożu stalowym przygotowanym do stopnia Sa 2 $\frac{1}{2}$ w środowisku korozyjnym C5 wg PN-EN ISO 12944-2:2018-02 [8] dla okresu trwałości długiego (H) wg normy PN-EN ISO 12944-1:2018 [9].

Tak przygotowane próbki zostały poddane badaniom zgodnie z normą PN-EN ISO 12944-6:2018-03 [10], która wskazuje, jakie wymagania muszą spełnić systemy malarskie eksploatowane w danym środowisku korozyjnym i czasie. Następnie poddano je badaniom starzeniowym:

- w komorze wilgotnościowej zgodnie z normą PN-EN ISO 6270-1:2018-02 [11] przez 720 h;
- w komorze solnej zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2023-02, test NSS [12] przez 1440 h;
- cykli zmiennych zgodnie z załącznikiem B PN-EN ISO 12944-6:2018-03 [10]. Badanie trwało 12 cykli, a na jeden cykl składa się trzydniowa ekspozycja w komorze z narażeniem na promieniowanie UV, trzydniowa ekspozycja w komorze solnej oraz jeden dzień zamrażania w temperaturze $(-20 \pm 2)^\circ\text{C}$.

Przed i po badaniach starzeniowych badano przyczepność metodą pull-off zgodnie z PN-EN ISO 4624:2023-11 [13]. Po badaniach starzeniowych dokonano oceny stopni: spęczenia wg PN-EN ISO 4628-2:2016-03 [14], zardzewienia wg PN-EN ISO 4628-3:2025-02 [15], spękania wg PN-EN ISO 4628-4:2016-03 [16], złuszczenia wg PN-EN ISO 4628-5:2023-01 [17] oraz skorodowania wokół rysy (sztuczne uszkodzenie) wg PN-EN ISO 4628-8:2013-05 [18]. Każde badanie powtórzono na trzech próbkach, a wyniki podano jako średnią z nich.

Dodatkowo wykonano badanie spektroskopii impedancyjnej w układzie trójelektrodowym przed i po testach starzeniowych, analizę przygotowanego podłoża stalowego za pomocą skaninowego mikroskopu elektronowego oraz dokonano pomiaru profilu chropowatości (parametr Rz i Ra) obu powierzchni za pomocą interferometrycznego profilometru optycznego.

Wyniki badań i ich analiza

Największym wyzwaniem w przypadku testowania nowych sposobów przygotowania powierzchni przed malowaniem jest przyczepność powłok do podłoża. Jest ona kluczowym parametrem, bez spełnienia którego eksploatacja powłok w ciężkich korozyjnych środowiskach jest niemożliwa. Przytoczona PN-EN ISO 12944-6:2018-03 [7] wskazuje, że wytrzymałość na odrywanie, mierzona metodą pull-off, powinna wynosić min. 5 MPa. Oba rodzaje próbek, przygotowane przez ablację laserową i obróbkę strumieniowo-ścierną spełniają wymagane minimum (tabela 1).

Table 1. Adhesion test results for new coatings and coatings after ageing tests. The result is presented as the average of three measurements on three samples. Samples A – substrate prepared by laser ablation; samples B – substrate prepared by traditional abrasive blasting
Tabela 1. Wyniki badania przyczepności powłok nowych i po badaniach starzeniowych. Wynik przedstawiono jako średnią z trzech pomiarów na trzech próbkach. Próbkę A – podłoże przygotowane metodą ablacji laserowej; próbki B – podłoże przygotowane przez tradycyjną obróbkę strumieniowo-ścierną

Sample/Próbka	Coating adhesion [MPa]/Przyczepność powłoki [MPa]			
	initial/wyjściowa	after ageing test/po badaniu starzeniowym		
		in a humidity chamber/w komorze wilgotnościowej	in salt chamber/w komorze solnej	after variable cycles/po cyklach zmiennych
A	7,34 ± 0,43	7,82 ± 0,59	8,20 ± 0,67	7,41 ± 0,30
B	6,90 ± 0,43	6,25 ± 0,45	6,70 ± 0,77	6,96 ± 0,58

prepared by abrasive blasting (Table 2). This is consistent with reports in the literature [14], but at the same time interesting in relation to adhesion results, which usually increase with surface development. Careful application of the coatings allowed for a very similar thickness of the paint system to that used in industrial painting, which eliminates the variable nature of the paint system's protective barrier. After ageing tests, no damage was observed within the meaning of the PN-EN ISO 4628:2 ÷ 5 series of standards (Table 2). Even very demanding testing in variable cycles, which is performed for structures operated in very harsh corrosive conditions, did not reveal any surface damage.

Table 3 presents the results of substrate corrosion and blistering along the scratch after ageing tests in a salt spray chamber (1440 h) and after variable cycles (12 cycles). The artificial damage, in the form of a 2 mm thick scratch, allows to assess how the paint system behaves after damage, including how quickly undercoating corrosion develops. The PN-EN ISO 12944-6: 2018-03 [10] requires that corrosion in paint systems does not exceed 1.5 mm after testing in a salt spray chamber and 3.0 mm in the case of testing in alternating cycles. In the case of samples whose substrate was prepared

Próbki serii A przed badaniami starzeniowymi i po każdym badaniu starzeniowym charakteryzują się większą przyczepnością niż ich odpowiedniki przygotowane strumieniowo-ściernie. Może to wskazywać, że podłoże przygotowane przez ablację laserową zapewnia bardzo dużą przyczepność powłok.

Parametry profilu powierzchni próbek przygotowanych laserowo były ok. trzykrotnie mniejsze niż próbek przygotowanych przez obróbkę strumieniowo-ścierną (tabela 2). Jest to zgodne z doniesieniami literaturowymi [14], lecz jednocześnie interesujące w odniesieniu do wyników adhezji, które zwykle zwiększają się wraz z rozwinięciem powierzchni. Staranna aplikacja powłok pozwoliła na bardzo zbliżoną, jak na malowanie przemysłowe, grubość systemu malarskiego, co pozwala wyeliminować czynnik zmiennego charakteru bariery ochrony systemu malarskiego. Po przeprowadzonych badaniach starzeniowych nie zaobserwowano zniszczeń w rozumieniu serii norm PN-EN ISO 4628:2 ÷ 5 (tabela 2). Nawet bardzo wymagające badanie w cyklach zmiennych, które wykonuje się na potrzeby konstrukcji eksploatowanych w bardzo ciężkich korozyjnych warunkach, nie pokazało powierzchniowych zniszczeń.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki skorodowania podłoża i spęcherzenia wzdłuż rysy po badaniach starzeniowych w ko-

Table 2. Results of substrate roughness profile, paint system thickness and determination of the degree of damage after ageing tests
Tabela 2. Wyniki profilu chropowatości podłoża, grubości systemu malarskiego i określenie stopnia zniszczeń po badaniach starzeniowych

Sample/Próbka	Coating thickness μm /Grubość powłoki μm	Rz μm	Ra μm	Crushing/Spęcherzenie	Hardening/Zardzewienie	Exfoliation/Złuszczenie	Cracks/Spękania
after 720 hours in a humidity chamber/po 720 h w komorze wilgotnościowej							
A	242 ± 12	10,07	2,08	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)
B	240 ± 8	30,25	5,12	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)
after 1440 hours in a salt chamber/po 1440 h w komorze solnej							
A	238 ± 11	10,88	2,12	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)
B	237 ± 14	34,52	6,06	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)
after 12 variable cycles/po 12 cyklach zmiennych							
A	242 ± 10	9,56	2,03	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)
B	241 ± 14	33,47	5,85	0(S0)	Ri 0	0(S0)	0(S0)

Table 3. Results of corrosion testing around the scratch (artificial damage) after ageing tests

Tabela 3. Wyniki badania skorodowania wokół rysy (sztucznego uszkodzenia) po badaniach starzeniowych

Sample/Próbka	Ageing test/Badanie starzeniowe			
	salt chamber/komorze solna		variable cycles/cykle zmienne	
	corrosion [mm]/skorodowanie [mm]	blistering (at scratch)/spęcherzenie (przy rysie)	corrosion [mm]/skorodowanie [mm]	blistering (at scratch)/spęcherzenie (przy rysie)
A	1,6 ± 0,4	2(S3) do 4 mm	4,3 ± 1,1	5(S5) do 9 mm
B	0	0(S0)	2,4 ± 0,4	0(S0)

by traditional abrasive blasting, this requirement was met. Samples from series A, whose substrate was prepared by laser ablation, did not meet the requirements of significant corrosion in each of the ageing tests. The results were not surprising, as numerous blisters formed along the scratches during ageing, which in this test usually indicate the onset of corrosion processes under the coating. The number and size of the blisters increased with ageing time. These results suggest that on a substrate prepared in this way, the evaluated paint system does not adequately protect areas of coating damage.

The figure shows the results of impedance spectroscopy testing of both samples: A and B, which were performed in a three-electrode system. The working electrode was the tested steel surface prepared by laser ablation (series A samples) or abrasive blasting to Sa 21 according to PN-EN ISO 8501-1:2008 [2] (series B samples). The impedance graphs shown in the figure in the initial state indicate that there are no differences between the tested samples, which may be related to the very good protective properties of the paint system. Under the test conditions, there was no electrolyte penetration, hence no distinction was made between the activity of the substrate after both types of preparation. Ageing tests, both for 1440 hours in a salt spray chamber and cyclic tests (12 cycles), indicate that the system performs slightly better on a substrate prepared by traditional abrasive blasting. There is a slight decrease in the impedance modulus in the low frequency range (below 1 Hz). The observed changes are insignificant and it cannot be clearly stated whether sub-coating reactions occurred during ageing in the salt chamber or during variable cycles.

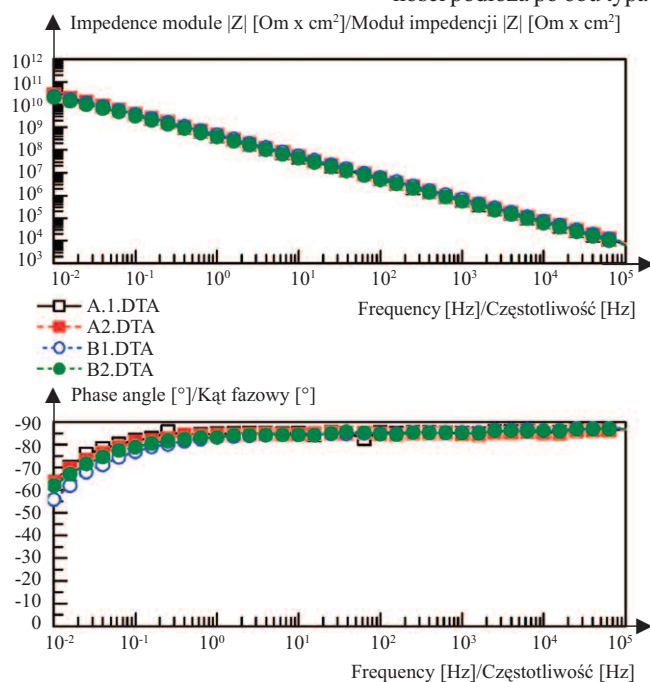
Photograph 1 shows a cross-section of a sample whose substrate was prepared using laser ablation. Photographs of the samples (photographs 1 and 2) were taken using a scanning electron microscope (SEM). The chemical composition was analysed using an EDS spectroscope. Along with the cross-section view, maps of the distribution of four elements with corresponding colours were included: iron (yellow), oxygen (green), carbon (red) and magnesium (sea blue). The closer to the surface of the cross-section, the greater the presence of oxygen. This indicates the presence of iron oxides,

morze solnej (1440 h) i po cyklach zmiennych (12 cykli). Wykonane sztuczne uszkodzenie, w formie rysy o grubości 2 mm, pozwala ocenić, jak zachowuje się system malarski po jego uszkodzeniu, w tym jak szybko rozwija się korozja podpowłokowa. Norma PN-EN ISO 12944-6: 2018-03 [10] stawia wymagania systemom malarskim, aby skorodowanie nie przekraczało 1,5 mm po badaniu w komorze solnej i 3,0 mm w wypadku badania w cyklach zmiennych. W wypadku próbek, których podłoże było przygotowane poprzez tradycyjną obróbkę strumieniowo-ścierną, wymienione wymaganie zostało spełnione. Próbkę serii A, których podłoże było przygotowane metodą ablacji laserowej, nie spełniły wymagań maksymalnego skorodowania w przypadku każdego z badań starzeniowych. Wyniki nie były zaskakujące, gdyż już w trakcie starzenia wzdłuż rysy tworzyły się liczne pęcherze, które zwykle świadczą w tym badaniu o rozpoczęciu procesów korozyjnych pod powłoką. Liczba i rozmiar pęcherzy powiększały się wraz z czasem starzenia. Wyniki te sugerują, że na tak przygotowanym podłożu oceniany system malarski nie chroni odpowiednio miejsc uszkodzenia powłoki.

Na rysunku przedstawiono wyniki badania spektroskopii impedancyjnej obu próbek: A i B, które wykonano w układzie trójelektrodowym. Elektroda roboczą była badana powierzchnia stali przygotowana odpowiednio za pomocą ablacji laserowej (próbki serii A) lub obróbki strumieniowo-ściernej do stopnia Sa 2½ wg PN-EN ISO 8501-1:2008 [2] (próbki serii B). Wykresy impedancyjne pokazane na rysunku w stanie wyjściowym wskazują, że nie ma różnic pomiędzy badanymi próbkami, co może być związane z bardzo dobrymi właściwościami ochronnymi systemu malarskiego. W warunkach testu nie doszło do penetracji elektrolitu, stąd nie rozróżnia się aktywności podłoża po obu typach przygotowania. Badania starzenio-

we, zarówno przez 1440 h w komorze solnej, jak i badania cykliczne (12 cykli) wskazują, że nieznacznie gorzej zachowuje się system na podłożu przygotowanym przez tradycyjną obróbkę strumieniowo-ścierną. Zauważalny jest nieznaczny spadek modułu impedancji w zakresie niskich częstotliwości (poniżej 1 Hz). Obserwowane zmiany są nieznaczne i nie można jednoznacznie stwierdzić, czy doszło do reakcji podpowłokowych w trakcie starzenia w komorze solnej lub cykli zmiennych.

Na fotografii 1 przedstawiono zdjęcie przekroju poprzecznego próbki, której podłoże zostało przygotowane metodą ablacji laserowej. Zdjęcia próbek (fotografie 1 i 2) zostały wykonane za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM). Analizę składu chemicznego przeprowadzono z wykorzystaniem spektro-



Impedance results in the Body's system for samples from series A and B; dependence of the impedance modulus on frequency

Wyniki impedancyjne w układzie Body'ego próbek serii A i B; zależność wartości modułu impedancji od częstotliwości

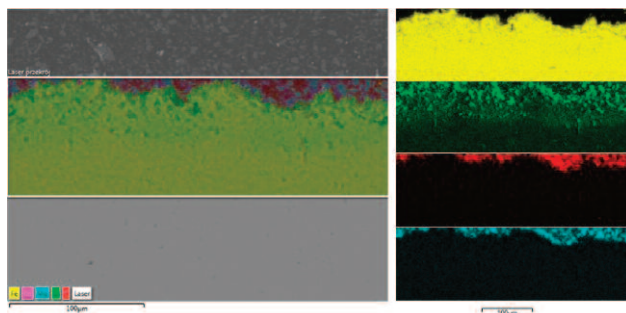


Photo 1. Scanning electron microscope (SEM) image of a cross-section of a sample prepared by laser ablation, together with a map of selected elements; element designation: yellow – Fe, green – O₂, red – C, sea blue – Mg

Fot. 1. Zdjęcie mikroskopowe (SEM) przekroju poprzecznego próbki przygotowanej przez ablację laserową wraz z mapą wybranych pierwiastków; oznaczenie pierwiastków: żółty – Fe, zielony – O₂, czerwony – C, morski – Mg

most likely originating from scale, a form of steel corrosion that occurs during high-temperature processing (laser ablation is accompanied by elevated temperatures). The scale layer is undesirable because it significantly accelerates the development of undercoat corrosion. This is because the iron oxides in the scale have a different electrochemical potential than the steel underneath, and this leads to the formation of a local galvanic cell in which steel is the anode. The zinc oxide layer is also responsible for reducing the adhesion properties of paint coatings, which was not the case in the presented results of the paint system adhesion tests. For this reason, a microscopic photograph was also taken, together with a map of the distribution of elements on the surface of the sample (photograph 2). The surface shows cracks characteristic of zinc dust. In addition to the zinc dust, numerous localised spots were also found, which were cleaned of steel oxides. It is likely that the presence of these irregularly distributed and shaped spots, together with the very good properties of the paint used, contributed to the positive adhesion results obtained for the tested samples. At the same time, the presence of scale explains the high corrosion values obtained around the scratch after the ageing tests.

Summary and conclusions

The conducted research comparing the behaviour of the paint system on steel substrates prepared using two methods: laser ablation and traditional abrasive blasting, shows that the laser ablation technique can be used for anti-corrosion work, but still requires further work and research due to the formation of an unfavourable and unwanted thin layer of iron oxides resulting from high temperatures during cleaning. Considering the requirements for painting systems to obtain a National Technical Assessment, the tested painting system on a substrate prepared by laser ablation did not receive a positive assessment due to excessive corrosion around the scratch after ageing testing in variable cycles. The corrosion around the scratch measuring 4.3 ± 1.1 mm is 1.3 mm greater than required. The other tests were successful, which suggests that appropriate

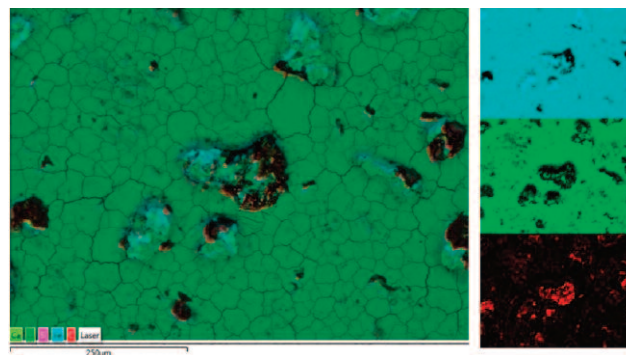


Photo 2. Microscopic image (SEM) of the surface of a sample prepared by laser ablation, together with a map of selected elements; element designation: sea blue – Fe, green – O₂, red – C
Fot. 2. Zdjęcie mikroskopowe (SEM) powierzchni próbki przygotowanej przez ablację laserową wraz z mapą wybranych pierwiastków; oznaczenie pierwiastków: morski – Fe, zielony – O₂, czerwony – C

skopu EDS. Wraz z widokiem przekroju zostały umieszczone mapy rozkładu czterech pierwiastków z odpowiadającymi im kolorami na mapach: żelaza (żółty), tlenu (zielony), węgla (czerwony) i magnezu (morski). Im bliżej powierzchni przekroju, tym obserwujemy większą obecność tlenu. Wskazuje to na obecność tlenków żelaza, najprawdopodobniej pochodzących od zendry, czyli formy korozji stali powstającej podczas jej wysokotemperaturowej obróbki (ablacji laserowej towarzyszy podwyższona temperatura). Warstwa zendry jest niepożądana, gdyż znacznie przyspiesza rozwijanie się korozji podpowłokowej. Dzieje się tak, gdyż tlenki żelaza w zendrze mają inny potencjał elektrochemiczny niż znajdująca się pod nim stal, a to prowadzi to utworzenia lokalnego ognia galwanicznego, w którym stal jest anodą. Zendra również jest odpowiedzialna za zmniejszenie właściwości adhezji powłok malarskich, co w wypadku przedstawionych wyników badań przyczepności systemu malarskiego nie miało miejsca. Z tego względu wykonano również zdjęcie mikroskopowe wraz z mapą rozkładu pierwiastków powierzchni próbki (fotografia 2). Na powierzchni widać charakterystyczne dla zendry spękania. Poza zendrą stwierdzono również obecność licznych miejscowych punktów, które oczyszczono z tlenków stali. Prawdopodobnie występowanie tych miejsc o nieregularnym rozkładzie i kształcie, wraz z bardzo dobrymi właściwościami stosowanej farby, wpłynęły na otrzymanie pozytywnych wyników adhezji w przypadku badanych próbek. Jednocześnie, obecność zendry tłumaczy otrzymane duże wartości skorodowania wokół rysy po badaniach starzeniowych.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone badania porównujące zachowanie systemu malarskiego na podłożach stalowych przygotowanych dwiema metodami: przez ablację laserową i tradycyjną obróbkę strumieniowo-ścierną pokazują, że technika ablacji laserowej może być wykorzystana w przypadku prac antykorozyjnych, jednak wymaga jeszcze nakładów pracy i badań ze względu na tworzenie się niekorzystnej i niechcianej cienkiej warstwy tlenków żelaza powstających w wyniku wysokiej temperatu-

modifications will allow all requirements to be met. The most important factor seems to be the appropriate and correct selection of laser parameters, including, above all, the power and contact time of the laser beam with the substrate, which will be the subject of further tests. Further plans also include taking into account the effect of laser ablation on welds, considering various of welding processes with particular emphasis on the examination and evaluation of changes in the heat-affected zone.

The method of preparing steel surfaces using laser ablation has ecological and economic advantages, which makes it interesting and worthy of further research. It also requires the development of standards, as the condition of the steel surface after laser cleaning is different from that after commonly used abrasive blasting.

Received: 19.06.2025

Revised: 26.08.2025

Published: 23.10.2025

ry podczas czyszczenia. Rozpatrując wymagania, jakie są stawiane systemom malarskim do uzyskania Krajowej Oceny Technicznej, badany system malarski na podłożu przygotowanym przez ablację laserową nie uzyskał więc pozytywnej oceny z powodu zbyt dużego skorodowania wokół rysy po starzeniowym badaniu w cyklach zmiennych. Skorodowanie wokół rysy wynoszącej $4,3 \pm 1,1$ mm jest o 1,3 mm większe niż wymagane. Pozostałe badania uzyskały wynik pozytywny, co pozwala domniemywać, że odpowiednie modyfikacje pozwolą na spełnienie wszystkich wymagań. Najistotniejszym wydaje się odpowiednie i prawidłowe dobranie parametrów lasera, w tym przede wszystkim mocy i czasu kontaktu wiązki laserowej z podłożem, co będzie przedmiotem kolejnych badań. W dalszych planach jest również uwzględnienie wpływu ablacji laserowej na spoiny z uwzględnieniem różnych procesów spawalniczych ze szczególnym naciskiem na zbadanie i ocenę zmian w strefie wpływu ciepła.

Metoda przygotowania powierzchni stali za pomocą ablacji laserowej ma walory ekologiczne i ekonomiczne, co czynią ją ciekawą i wartą prowadzenia dalszych badań. Wymaga również opracowań normowych, gdyż stan powierzchni stali po czyszczeniu laserem jest inny niż po powszechnie stosowanej obróbce strumieniowo-ściernej.

Artykuł wpłynął do redakcji: 19.06.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 26.08.2025 r.

Opublikowano: 23.10.2025 r.

Literature

- [1] Koch G. Cost of corrosion, Trends in Oil and Gas Corrosion Research and Technologies; 2017; <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101105-8.00001-2>.
- [2] 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.
- [3] PN-EN ISO 8503-2:2012 Przygotowanie podłoży stalowych przed nakładaniem farb i podobnych produktów – Charakterystyki chropowatości powierzchni podłoży stalowych po obróbce strumieniowo-ściernej – Część 2: Metoda stopniowania profilu powierzchni stalowych po obróbce strumieniowo-ściernej – Sposób postępowania z użyciem wzorca.
- [4] Narayanan V, Singh RK, Marla D. Laser cleaning for rust removal on mild steel: an experimental study on surface characteristics, MATEC Web Conf. 2018, <https://doi.org/10.1051/mateconf/201822101007>.
- [5] Liu Y, Liu W, Zhang D, Tian Z, Sun X, Wei Z. Experimental investigations into cleaning mechanism of ship shell plant surface involved in dry laser cleaning by controlling laser power, Appl. Phys. A 126 (2020) 866, <https://doi.org/10.1007/s00339-020-04050-y>.
- [6] Fujita K, Inagaki H, Toyosawa K, Takahara K, Utsushikawa T, Fujita H et al., kW-class laser cleaning for steel structure maintenance and decontamination. Atmosphere. 2020; https://doi.org/10.3327/jaesjb.62.5_259.
- [7] Cui K, Luo J, Xu K, Ling L, Cheng R. The Study of Patterns and Mechanisms of Continuous Laser Ablation of Carbon Steel Rust Layers in Multi-Medium Environments. Appl. Sci. 2024; <https://doi.org/10.3390/app14125052>.
- [8] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Budownictwa z 17 listopada 2016 r. w sprawie sposobu deklarowania właściwości użytkowych wyrobów budowlanych oraz sposobu znakowania ich znakiem budowlanym.
- [9] PN-EN ISO 12944-2:2018-02 Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 2: Klasyfikacja środowisk.

- [10] PN-EN ISO 12944-2:2018-02 Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 2: Klasyfikacja środowisk.
- [11] PN-EN ISO 12944-6:2018-03 Farby i lakiery – Ochrona przed korozją konstrukcji stalowych za pomocą ochronnych systemów malarskich – Część 6: Laboratoryjne metody badań właściwości.
- [12] PN-EN ISO 6270-1:2018-02 Farby i lakiery – Oznaczanie odporności na wilgoć – Część 1: Kondensacja (jednostronna ekspozycja).
- [13] PN-EN ISO 9227:2023-02 Badania korozyjne w sztucznych atmosferach – Badania w rozpylonej solance.
- [14] PN-EN ISO 4624:2023-11 Farby i lakiery – Próba odrywania do oceny przyczepności.
- [15] PN-EN ISO 4628-2:2016-03 Farby i lakiery – Ocena zniszczenia powłok – Określanie ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 2: Ocena stopnia spękania.
- [16] PN-EN ISO 4628-3:2025-02 Farby i lakiery – Ocena ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 3: Ocena stopnia zardzewienia.
- [17] PN-EN ISO 4628-4:2016-03 Farby i lakiery – Ocena zniszczenia powłok – Określanie ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 4: Ocena stopnia spękania.
- [18] PN-EN ISO 4628-5:2023-01 Farby i lakiery – Ocena zniszczenia powłok – Określanie ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 5: Ocena stopnia złuszczenia.
- [19] PN-EN ISO 4628-8:2013-05 Farby i lakiery – Ocena zniszczenia powłok – Określanie ilości i rozmiaru uszkodzeń oraz intensywności jednolitych zmian w wyglądzie – Część 8: Ocena stopnia odwarstwienia i skorodowania wokół rysy lub innego sztucznego uszkodzenia.
- [20] Wang Q, Kainuma S, Zhuang S, Haraguchi M. Effect of continuous wave laser treatment on the adhesion and durability of Heavy-Duty Paint coated carbon steel. Case Studies in Construction Materials. 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02420>.