

Wojciech SKOTNICKI<sup>1</sup>

## ZRÓŻNICOWANIE WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNYCH I ODPORNOŚCI KOROZYJNEJ POWŁOK CYNKOWYCH OTRZYMANÝCH NA STOPACH Fe-C

**Streszczenie:** W pracy przedstawiono badania właściwości powłok cynkowych, które określono poprzez badania tribologiczne, pomiary twardości oraz odporność korozyjną. Dodatkowo przeprowadzono analizę mikroskopową oraz wykonano pomiary struktury geometrycznej powierzchni. Porównywano następujące rodzaje powłok cynkowych: ogniową, galwaniczną i lamelową. Powłoki zostały naniesione na części osprzętu energetycznego wykonanego z żeliwa szarego (GJL-250) oraz ze stali (23MnB4).

**Słowa kluczowe:** stopy żelaza, powłoka antykorozyjna, tribologia, odporność korozyjna

## DIVERSITY OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF ZINC COATINGS OBTAINED ON Fe-C ALLOYS

**Summary:** The paper presents tests of the properties of zinc coatings determined by tribological tests, hardness measurements and corrosion resistance. Additionally, a microscopic analysis was performed and measurements of the geometrical structure of the surface were made. The following types of zinc coatings were compared: fire, galvanic and lamella. The coatings were applied to parts of power equipment made of gray cast iron (GJL-250) and steel (23MnB4).

**Keywords:** iron alloys, anti-corrosion coating, tribology, corrosion resistance

### 1. Wprowadzenie

Co roku są wycofywane z eksploatacji miliony metalowych części maszyn i urządzeń z powodu ich zużycia przez utlenianie. Najbardziej podatne na korozję atmosferyczną wywołaną tlenem i wilgocią z powietrza są części wykonane ze stopów żelaza, tj. ze stali i żeliwa. W praktyce stosuje się wiele metod zabezpieczania przed korozją. Do najpopularniejszych należą: nanoszenie powłok z farb i lakierów, aluminiowanie i cynkowanie [1, 2]. Powłoki cynkowe są najbardziej efektywnym i ekonomicznym sposobem zabezpieczania stopów żelaza przed korozją. Zagadnienia odporności materiałów metalicznych w środowiskach naturalnych są niezwykle istotne

---

<sup>1</sup> Akademia Techniczno-Humanistyczna, Katedra Podstaw Budowy Maszyn, wskotnicki@ath.bielsko.pl

w projektowaniu części maszyn. W dostępnej literaturze przedstawiono wiele badań dotyczących wpływu błędów konstrukcyjnych popełnianych podczas projektowania, które przyspieszają procesy korozyjne [1-4]. Niewłaściwy dobór części maszyn oraz sposób ich montażu ma istotny wpływ na przedwczesne pojawienie się ognisk korozyjnych, a w konsekwencji na zmniejszenie wytrzymałości całej konstrukcji [1-4]. Korozja w miejscu połączeń śrubowych w częściach maszyn i konstrukcji ma szczególne znaczenie, ponieważ prowadzi do zmian składu chemicznego materiału będącego w kontakcie z atmosferą. W wyniku korozji stykowej następuje m.in.: zmniejszenie przekroju czynnego, powstawanie szczelin, wżerów oraz innych nieciągłości materiału. Trwałość mechaniczna powierzchni jest jednym z głównych parametrów zarówno w mechanice kontaktu, jak i w teorii tarcia, a także podstawowym parametrem w prognozowaniu wytrzymałości części maszyn stosowanych w przemyśle [4]. Twardość jest również istotnym parametrem oceny jakości powłok ochronnych. Najczęściej wykonuje się pomiary mikrotwardości metodą Vickersa. Odporność na ścieranie jest ważnym kryterium doboru powłoki do danego zastosowania. Twardość powłoki można zwiększyć do 500 HV przez wprowadzenie pierwiastków stopowych, takich jak Ni (14%) [2]. Dlatego producenci części m.in. dla przemysłu energetycznego stosują zazwyczaj powłoki ZnNi do połączeń śrubowych zewnętrznych.

Najstarszą metodą stosowaną na skalę przemysłową do ochrony antykorozyjnej powierzchni części stalowych i żeliwnych jest cynkowanie zanurzeniowe, powszechnie znane, jako ogniowe. Powłoka otrzymana metodą zanurzeniową posiada złożoną budowę warstwową. Składa się z faz międzymetalicznych zgodnych z układem równowagi Fe-Zn ( $\Gamma$ ,  $\delta$  i  $\zeta$ ) oraz warstwy zewnętrznej roztworu stałego Fe w Zn (faza  $\eta$ ). Wierzchnia warstwa zbudowana z czystego cynku tworzy się podczas wynurzania cynkowanej części z wanny zawierającej ciekły metal [4]. Warstwa  $\eta$  zapewnia wymaganą odporność korozyjną powłoki w jej początkowym etapie eksploatacji. Natomiast fazy układu Fe-Zn zmniejszają intensywność korozji części w trakcie dalszej ekspozycji na warunki atmosferyczne. Stanowi to jedną z istotniejszych zalet w zachowaniu się powłok w środowisku korozyjnym.

Proces cynkowania galwanicznego jest najbardziej rozpowszechnioną technologią stosowaną w praktyce przemysłowej. Powłoki cynkowe osadzone elektrolitycznie są powszechnie stosowane do ochrony stali przed czynnikami atmosferycznymi prowadzącymi do powstawania korozji. Powłoki cynkowe są klasyfikowane jako ochronne, czyli mające na celu wyłącznie zabezpieczenie metalu - podłoża przed korozją [5].

Najnowszą technologią wykorzystującą cynk do ochrony stali jest cynkowanie lamelowe (płatkowe). Jest to proces typowo adhezyjny, powierzchnia przed zanurzeniem jest przygotowana w taki sposób, by uzyskać jak największy stopień rozwinięcia. Odpowiednia przyczepność powłoki do podłoża wpływa bezpośrednio na trwałość powłoki [6]. Proces ten polega na zanurzeniu części w roztworze farby cynkowej z dodatkiem aluminium i wygrzanie takiej powłoki w piecu, w temperaturze 220÷380 °C. W strefie pierwszej pieca następuje wstępne odparowanie rozpuszczalników, a w strefie głównej utwardzanie warstwy cynkowej. W celu uzyskania szczelnej warstwy powłokę bazową nakłada się minimum dwa razy, a obróbką końcową jest nałożenie warstwy nawierzchniowej, czyli rodzaju lakieru termoutwardzalnego. Rozpuszczalnikiem, w którym zdyspergowane są płatki cynku

jest lotny związek organiczny lub woda. O adhezji powłoki oraz jej grubości decyduje wspomniana wcześniej obróbka powierzchniowa oraz lepkość farby [6].

Istotnym zagadnieniem związanym z odpornością na działanie środowiska korozyjnego przedstawionych powyżej powłok są badania w warunkach eksploatacji. Ekspozycja w naturalnych warunkach atmosferycznych w celu określenia odporności korozyjnej jest procesem zbyt długotrwałym, w rezultacie tego typu proces określenia trwałości powłok jest niepraktyczny i kosztowny [7]. Alternatywnym rozwiązaniem jest zastosowanie przyspieszonych testów laboratoryjnych, które symulują warunki naturalne wykorzystując czynniki o zwiększonej intensywności oddziaływania. Badania przyspieszone są prowadzone w tak dobranych warunkach laboratoryjnych, aby proces korozji przebiegał szybciej niż w warunkach naturalnych, a uzyskane wyniki dla różnych partii produkcyjnych mogły być porównywalne. Metody badań w mgłach roztworów należą do częściej stosowanych metod przyspieszonych. Jedną z tych metod jest metoda badań w mgle solnej, stosowana od kilkudziesięciu lat do badania odporności korozyjnej metali i powłok ochronnych. Badania w mgle solnej polegają na umieszczeniu badanych próbek w komorze, w której jest rozpylany bez przerwy lub okresowo roztwór chlorku sodu w wodzie destylowanej. Dokładne warunki wykonania badań (temperatura i wilgotność w komorze, szybkość zbierania się mgły, stężenie i pH rozpylanej solanki, sposób natryskiwania itp.) są znormalizowane [6, 7].

Poza wysoką odpornością na korozję wywołaną warunkami atmosferycznymi powłoki cynkowe powinny wykazywać również wysoką odporność na zużycie tribologiczne, tj. spowodowane procesami tarcia. Do określenia odporności na uszkodzenia mechaniczne stosuje się m.in. badania tribologiczne, które mają szczególne znaczenie dla wyjaśnienia trwałości powłok cynkowych narażonych na działanie obciążeń zewnętrznych [7]. Wszystkie powłoki metalowe wytwarzane na skalę przemysłową są w jakimś stopniu porowate. Ponadto powłoki mogą ulegać uszkodzeniu w czasie transportu lub użytkowania. Dlatego też powstałe w ten sposób duże pory lub rysy w powłoce cynkowej mogą wpływać na własności antykorozyjne tej powłoki [8]. Wiele części maszyn podczas użytkowania jest narażone na tacie ślizgowe, np. gwintowane części złączne, zasuwy i elementy armatury przemysłowej. Powłoka zabezpieczająca przed korozją powierzchnie narażone na tarcie powinna dodatkowo zmniejszać tarcie. Dlatego nałożona na części złączne powłoka cynkowa powinna charakteryzować się małym współczynnikiem tarcia, co ułatwia dokręcanie i zmniejsza zużycie podczas wielokrotnego montażu oraz odpornością na fretting. Rezultatem współpracy trących o siebie części jest zużycie tribologiczne, czyli proces niszczenia i usuwania materiału z powierzchni ciał stałych w wyniku tarcia, powodujący ciągłą zmianę wymiarów i kształtów trących części [9]. Zużycie ściernokorozyjne (fretting) jest zjawiskiem niszczenia warstwy wierzchniej, polegającym na powstawaniu miejscowych ubytków materiału w częściach poddanych działaniu drgań lub niewielkich poślizgów, w wyniku cyklicznego oddziaływania obciążeń oraz intensywnego oddziaływania środowiska korozyjnego [10]. Stosowane w energetyce połączenia gwintowe zaciskające przewody wysokiego napięcia są narażone na tarcie z mikroprzemieszczeniami wymuszonymi przez poddmuchy wiatru. Mikroprzemieszczenia powodują zużycie frettingowe i korozję frettingową powierzchni dociskających przewody. Zużycie frettingowe powoduje lokalne

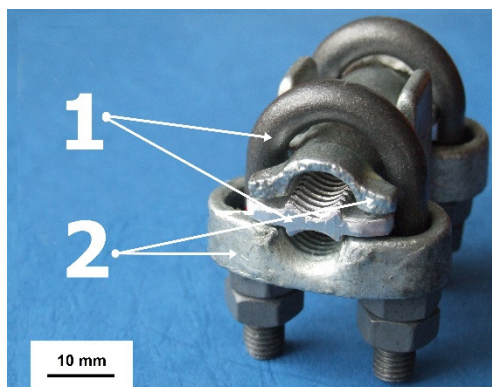
nagromadzenie tlenków, które zwiększają oporność styków i powodują ich nadmierne nagrzewanie.

Długie czasy użytkowania pomiędzy rozkręcaniem i skręcaniem powodują adhezyjne szpewienia połączeń śrubowych w wyniku dyfuzji składników warstw wierzchnich łączonych części. Podczas rozkręcania następuje zniszczenie szpewień adhezyjnych i zużywanie powłoki. Dlatego powłoka ochronna powinna charakteryzować się odpornością na szpewianie, utlenianie i zużycie powodowane tarcieniem. W łącznikach śrubowych stosowanych np. w energetyce zarówno odlewane z żeliwa szarego korpusy łączników, jak i stalowe śruby są cynkowane. Pomimo, że powłoki cynkowe są powszechnie stosowane od wielu lat, to w dalszym ciągu są prowadzone badania mające na celu poprawę ich właściwości [11].

Odpowiedni dobór powłoki zapewnia osiągnięcie bardzo dużej odporności korozyjnej, możliwe jest też uzyskanie przez wprowadzenie odpowiedniego dodatku - powłok o określonym współczynniku tarcia, który ma również znaczenie przy wkręcaniu śrub z zakładanym momentem [12]. Celem prezentowanych badań było porównanie właściwości tribologicznych oraz odporności korozyjnej powłok cynkowych naniesionych na powierzchnie części stalowych w odniesieniu do powłok otrzymanych na częściach żeliwnych.

## 2. Badania własne

Próbki do badań zostały pobrane z części stosowanych do produkcji osprzętu sieciowego – uchwytów śrubowo-kabłąkowych typu NK 2421 służących do zamykania pętli na uchwytach odciągowych kabłąkowych oraz łączenia dwóch przewodów (rysunek 1). W wersji podstawowej wieszak śrubowo-kabłąkowy oraz przekładka (1) wykonane są ze stali 23MnB4. Do produkcji korpusu oraz nakładki (2) zastosowano żeliwo szare GJL-250 z grafitem. W celu zwiększenia odporności na działanie środowiska atmosferycznego powierzchnie części uchwytów należy zabezpieczyć powłoką cynkową.



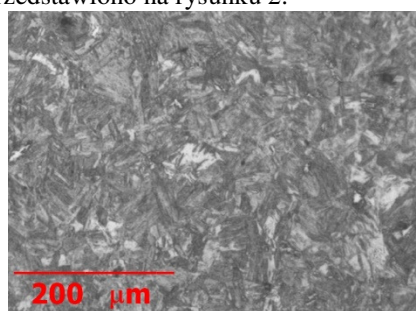
Rysunek 1. Osprzęt sieciowy zastosowany do badań - uchwyt śrubowo-kabłąkowy

Skład chemiczny stali 23MnB4 był zgodny z normą EN 10263-4-2001 [13] i został przedstawiony w tabeli 1.

Tabela 1. Skład chemiczny części stalowych

Skład chemiczny stali 23MnB4 (1.5535): EN 10263-4-2001 [13], %							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni
0.2 – 0.25	max 0.3	0.9 – 1.2	max 0.025	max 0.025	max 0.3	max 0.25	Max 0.005

Mikrostrukturę stali przedstawiono na rysunku 2.



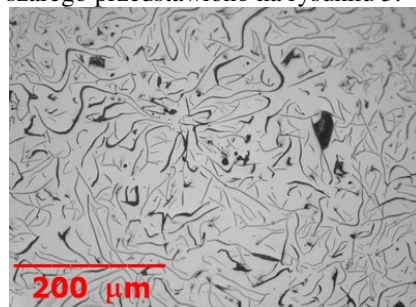
Rysunek 2. Mikrostruktura badanych materiałów – stal 23MnB4

Skład chemiczny części wykonanych z żeliwa szarego odpowiadał normie PN-EN 1560:2011 [14] i został przedstawiony w tabeli 2.

Tabela 2. Skład chemiczny części żeliwnych

Skład chemiczny żeliwa EN-GJL-250: PN-EN 1560: 2011 [14], %							
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cu	Cr
3.25	2.00	0.55	0.065	0.035	0	0	0

Mikrostrukturę żeliwa szarego przedstawiono na rysunku 3.



Rysunek 3. Mikrostruktura badanych materiałów – żeliwo GJL-250

Pierwszym etapem eksperymentu był proces cynkowania przeprowadzony trzema różnymi metodami: ogniową, galwaniczną i lamelową. Procesy cynkowania wykonano zgodnie z normami: dla powłoki ogniowej PN-EN ISO 10684:2006 [15], dla powłoki galwanicznej PN-EN ISO 4042:2018-11 [16] i dla powłoki lamelowej PN-EN ISO 10683:2018-11 [17]. Nałożenie powłok cynkowych obejmowało zarówno części stalowe jak i żeliwne. Parametry cynkowania przedstawiono w tabeli 3

Tabela 3. Parametry procesu cynkowania

Rodzaj procesu	Przygotowanie powierzchni
Cynkowanie ogniowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• trawienie w 12% HCl</li> <li>• topnikowanie</li> <li>• cynkowanie ogniowe: Zn z dodatkiem Al, Bi, Ni; temp. 460 °C</li> <li>• chłodzenie w wodzie</li> </ul>
Cynkowanie galwaniczne	<ul style="list-style-type: none"> <li>• chemiczne odtłuszczenie w temp. 60 °C</li> <li>• trawienie w 18% HCl i 10% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> z inhibitorami</li> <li>• odtłuszczenie i elektro-polerowanie, temp. 60 °C, 1000 A</li> <li>• cynkowanie elektrolityczne Zn kąpiel w temp. 35 °C,</li> <li>• pasywacja jony Cr<sup>3+</sup>, Co<sup>2+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> temp. 45 °C, pH 1,9</li> </ul>
Cynkowanie lamelowe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• śrutowanie 0.4 mm</li> <li>• malowanie (95% Zn, 5% Al)</li> <li>• wygrzewanie w temperaturze 120 °C</li> <li>• chłodzenie powietrzem do temperatury 25 °C</li> </ul>

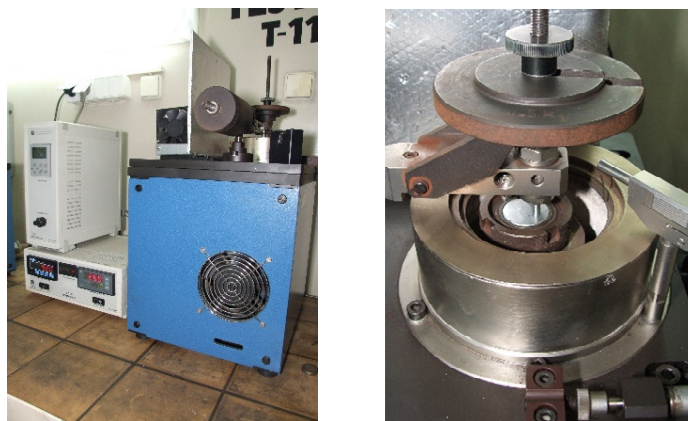
Nieprawidłowe przygotowanie powierzchni części uchwytów może powodować, że powłoka cynkowa jest popękana i złuszczone, a w miejscach nieciągłości mogą powstawać ogniska korozji widoczne na rysunku 4.



Rysunek 4. Nakładka uchwytu z widocznymi ogniskami korozji

Badania powłok cynkowych obejmowały pomiary chropowatości, grubości powłoki metodą wykorzystującą zjawisko indukcji magnetycznej oraz obserwacje mikroskopowe struktury. Przeprowadzono pomiary odporności cieiernej, uzupełniając badania o pomiary twardości. Odporność korozyjną badano w warunkach laboratoryjnych w komorze solnej. Otrzymane wyniki badań dla części stalowych porównano do tych jakie otrzymano dla części wykonanych z żeliwa szarego.

Pierwszym etapem badań był pomiar topografii powierzchni 3D otrzymanych powłok cynkowych. Badano powłoki które zostały naniesione na powierzchnię części stalowych jak i części żeliwnych. Do pomiarów zastosowano urządzenie PhaseView wykorzystujące zaawansowane systemy optyczne analizy 3D. Analizę uzyskanych pomiarów prowadzono z dołączonym fabrycznie oprogramowaniem GetPhase. Następnie mierzono grubość powłoki metodą wykorzystującą zjawisko indukcji magnetycznej. Zastosowano miernik grubości powłok do badań nieinwazyjnych PosiTector 6000MP z sondą prostą na przewodzie. Badania uzupełniono podczas obserwacji mikroskopowych. Do obserwacji metalograficznych zastosowano mikroskop optyczny Axiovert A – 100 i mikroskop skaningowy Joel – J7. Badania twardości wykonano zgodnie z normą PN-EN ISO 14577-1:2015-09 [18], przy zastosowaniu urządzenia NHT2 firmy Anton Paar. Prace badawcze przeprowadzono dla maksymalnego obciążenia 20 mN z użyciem diamentowego wgłębnika typu Berkovitch. Pomiar twardości wykonano w pięciu miejscach. Kolejnym etapem były badania charakterystyk ciernych, które przeprowadzono na stanowisku T-11 (rysunek 5). Przeciwpółka była wykonana ze stali 23MnB4 i miała średnicę 4 mm. Prędkość obrotowa równa była 30 obr./min. W trakcie badania przy obciążeniu jednostkowym  $p_t=0,25$  MPa rejestrowano w sposób ciągły siłę tarcia oraz temperaturę, która mieściła się w zakresie 22-35 °C.



Rysunek 5. Stanowisko do badań charakterystyk ciernych wraz z głowicą pomiarową

Dodatkowo badania uzupełniono o pomiar chropowatości badanej powierzchni w obrębie jej uszkodzenia. Badania przeprowadzono z zastosowaniem profilometru stykowego firmy Perthometer Concept (MAHR) z wyposażeniem i oprogramowaniem 3D oraz ostrzem odwzorowującym w kształcie stożka ( $R = 2 \mu\text{m}$ ,  $\Theta = 90^\circ$ ).

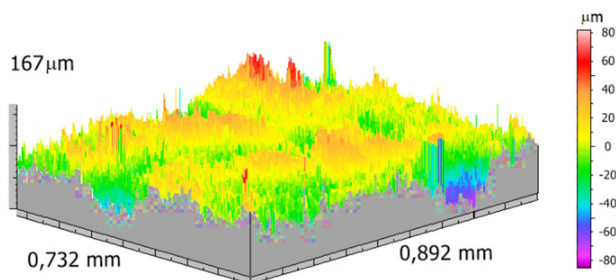
Ostatnim etapem prezentowanych badań było określenie odporności korozyjnej badanych części w komorze solnej. Badania prowadzono zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06 [19]. Parametry przyspieszonego procesu korozyjnego (NSS) były następujące: medium korozyjne -  $\text{NaCl } 50 \pm 5 \text{ g/dm}^3$ , gęstość roztworu  $1,035 \text{ g/cm}^3$ , wielkość opadu  $1,033 \text{ g/cm}^3$ , pH roztworu 6,7, ciśnienie powietrza 1 bar, temperatura wewnątrz komory 35°C. Po wyjęciu z komory badane części oczyszczano w 12% HCl

z dodatkiem 0,1% inhibitora korozji. Zgodnie z normą PN-EN ISO 9227:2017-06 [19] powierzchnię próbek oceniano w odstępach 24 godzinnych, a po upływie 1000 godzin badania w komorze solnej przerwano.

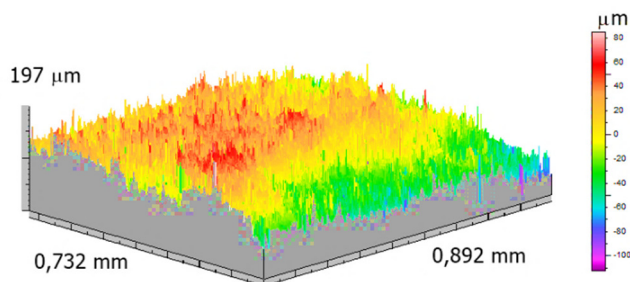
W celu bardziej precyzyjnego określenia udziału powierzchni próbek zajętej przez korozję „czerwoną” (głównie tlenku żelaza) zastosowano komputerową analizę obrazu – program „Image J”, w wersji 1.48. „Image J” to program typu „freeware” do komputerowego przetwarzania obrazu, napisany w języku programowania „Java” i oparty na otwartej architekturze. Za pomocą programu można edytować, analizować i przetwarzać obrazy o 8, 16 i 32 bitowej paletce kolorów. W programie można odpowiednio skalibrować wymiary obrazów w celu uzyskania rzeczywistych wyników.

### 3. Wyniki badań

Po przeprowadzeniu procesu cynkowania wykonano pomiary geometrii powierzchni, która w sposób znaczący może wpływać antykorozyjne otrzymanych powłok. Pomiarów dokonano dla części stalowych i żeliwnych. Przykładowe obrazy izometryczne powłok cynkowych naniesionych na części stalowe przedstawiono na rysunkach 6-8.

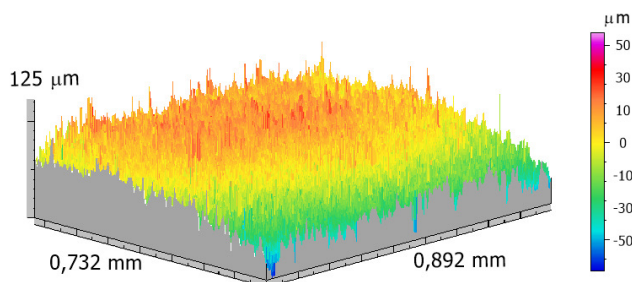


Rysunek 6. Wyniki pomiarów chropowatości 3D badanych topografii powierzchni po cynkowaniu ogniowym



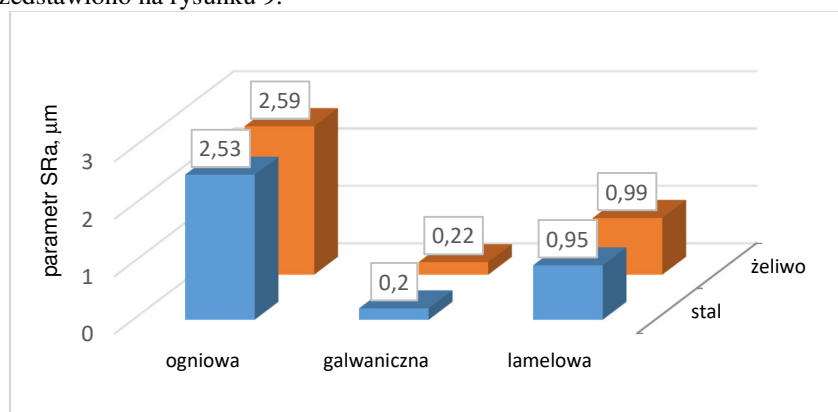
Rysunek 7. Wyniki pomiarów chropowatości 3D badanych topografii powierzchni po cynkowaniu galwanicznym





Rysunek 8. Wyniki pomiarów chropowatości 3D badanych topografii powierzchni po cynkowaniu lamelowym

Wyniki pomiarów średnich arytmetycznych odchyłeń od linii średniej SRa przedstawiono na rysunku 9.



Rysunek 9. Wyniki pomiaru topografii powierzchni powłok cynkowych – parametr SRa

W celu określenia grubości naniesionych powłok przeprowadzono badania grubości w dwóch etapach. Wyniki pomiarów grubości badanych powłok naniesionych na części stalowe metodą indukcji magnetycznej przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiaru grubości powłok cynkowych

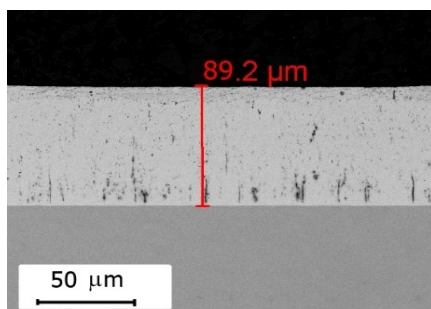
Rodzaj powłoki	Grubość powłoki cynkowej ( $\mu\text{m}$ ) dla stali					Średnia
	1	2	3	4	5	
ogniowa	89,2 min	89,7	89,8	90,5 max	89,3	<b>89,7</b>
galwaniczna	18,9	18,2 min	18,5	19,0 max	18,4	<b>18,6</b>
lamelowa	9,8 max	9,0 min	9,2	9,4	9,5	<b>9,4</b>

Wyniki pomiarów grubości badanych powłok naniesionych na części wykonane z żeliwa szarego przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wyniki pomiaru grubości powłok cynkowych

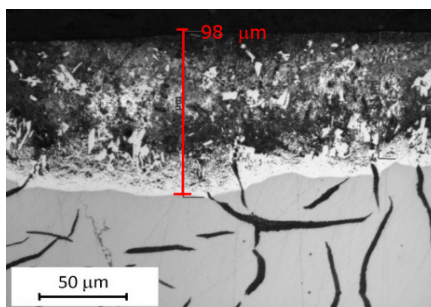
Rodzaj powłoki	Grubość powłoki cynkowej ( $\mu\text{m}$ ) dla żeliwa					Średnia
	1	2	3	4	5	
ogniowa	99,9 max	93,7 min	98,0	95,3	96,8	<b>96,7</b>
galwaniczna	20,5 max	20,1	19,3 min	19,7	20,2	<b>19,9</b>
lamelowa	10,6	10,2 min	11,3 max	10,9	10,9	<b>10,8</b>

W celu zweryfikowania otrzymanych wyników indukcji magnetycznej oraz określenia równomierności nałożonych powłok przeprowadzono badania mikroskopowe. Na rysunku 10 przedstawiono powłokę ogniową naniesioną na powierzchnię stalową.



Rysunek 10. Mikrostruktura powłoki cynkowej wraz z jej pomiarem grubości naniesionej na powierzchnię stalową

Rysunek 11 przedstawia powłokę cynkową ogniową uzyskaną na powierzchni części wykonanych z żeliwa szarego. Widoczna jest penetracja grafitu w głąb powłoki cynkowej.



Rysunek 11. Mikrostruktura powłoki cynkowej wraz z jej pomiarem grubości naniesionej na powierzchnię żeliwną

Kolejnym etapem eksperymentu był pomiar twardości naniesionych powłok. Średnią arytmetyczną głębokość penetracji węgelnika przedstawiono w tabeli 6. Wyniki dotyczą części stalowych.

Tabela 6. Wyniki pomiaru głębokości penetracji węgelnika

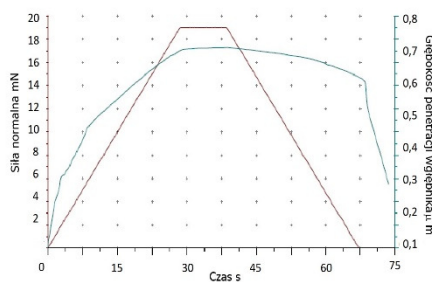
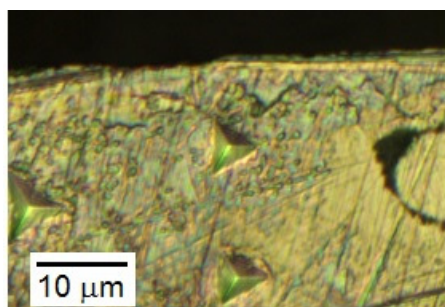
Rodzaj powłoki	Głębokość penetracji węgelnika ( $\mu\text{m}$ ) dla stali					
	1	2	3	4	5	Średnia
ogniowa	1,19	1,21	1,18 min	1,25 max	1,21	<b>1,21</b>
galwaniczna	1,34 min	1,35	1,37 max	1,36	1,35	<b>1,35</b>
lamelowa	0,80	0,80	0,79 min	0,80	0,82 max	<b>0,80</b>

W tabeli 7 przedstawiono wyniki pomiarów twardości dla powłok otrzymanych na częściach żeliwnych.

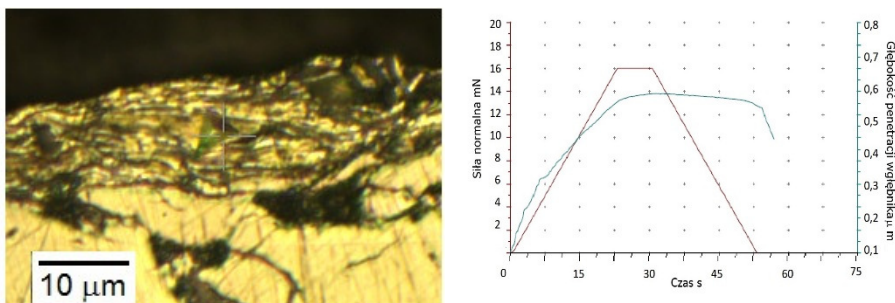
Tabela 7. Wyniki pomiaru głębokości penetracji węgelnika

Rodzaj powłoki	Głębokość penetracji węgelnika ( $\mu\text{m}$ ) dla żeliwa					
	1	2	3	4	5	Średnia
ogniowa	1,22 min	1,39 max	1,27	1,34	1,30	<b>1,30</b>
galwaniczna	1,37	1,35 min	1,39 max	1,39	1,38	<b>1,38</b>
lamelowa	0,85	0,84 min	0,85	0,86 max	0,86	<b>0,85</b>

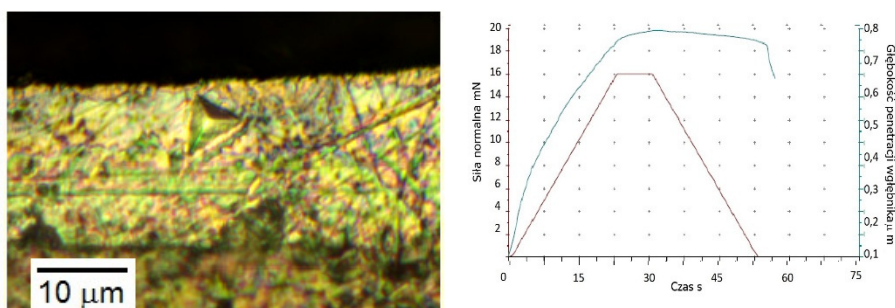
Dodatkowo na rysunkach 12-14 zaprezentowano mikrostrukturę w obrębie pomiaru oraz w sposób graficzny wyniki pomiarów twardości powłok naniesionych na części stalowe.



Rysunek 12. Mikrostruktura powłoki ogniowej oraz przykładowy wykres rejestrowany podczas pomiaru twardości

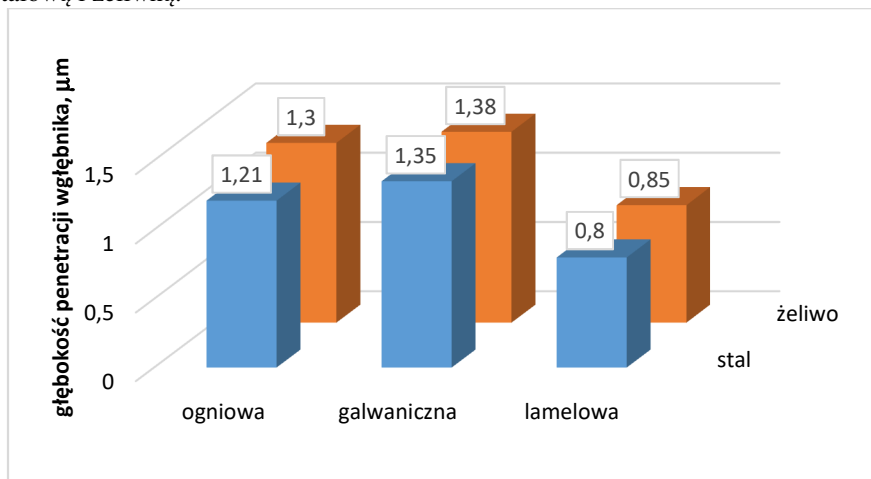


Rysunek 13. Mikrostruktura powłoki galwanicznej oraz przykładowy wykres rejestrowany podczas pomiaru twardości



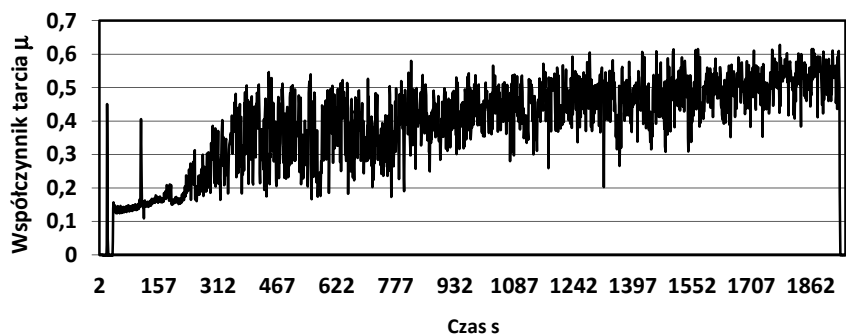
Rysunek 14. Mikrostruktura badanej powłoki lamelowej oraz przykładowy wykres rejestrowany podczas pomiaru twardości

Na rysunku 15 przedstawiono wyniki pomiaru głębokości penetracji węgelnika dla wszystkich trzech analizowanych powłok, które zostały naniesione na powierzchnię stalową i żeliwną.

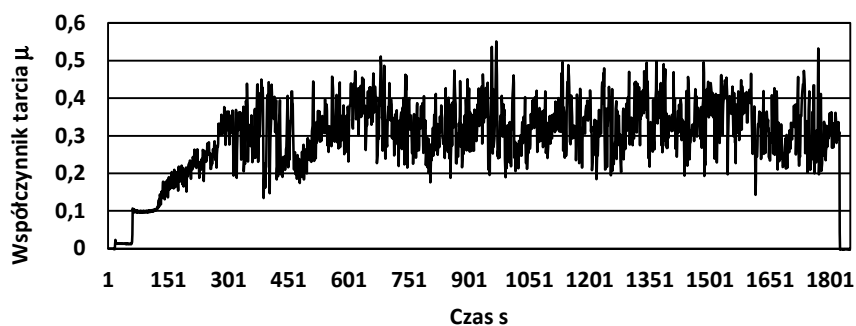


Rysunek 15. Średnie zmierzone wartości głębokości penetracji węgelnika

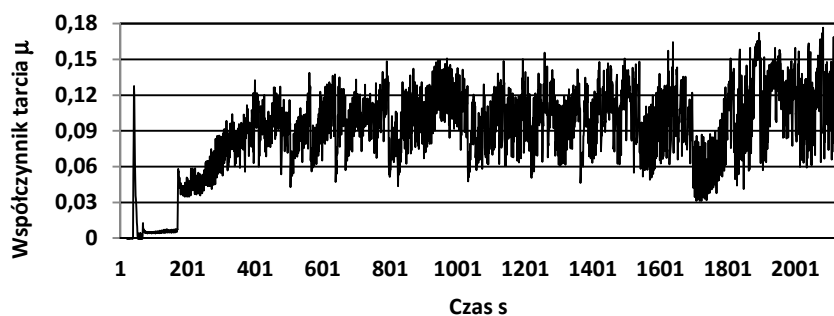
O trwałości powłok cynkowych decydować może ich odporność na zużycie w warunkach tarcia suchego. Zmiany współczynnika tarcia w funkcji czasu dla powłok cynkowych przedstawiono w formie wykresu na rysunkach 16-18.



Rysunek 16. Zmiana współczynnika tarcia w funkcji czasu dla powłoki ogniowej



Rysunek 17. Zmiana współczynnika tarcia w funkcji czasu dla powłoki galwanicznej



Rysunek 18. Zmiana współczynnika tarcia w funkcji czasu dla powłoki lamelowej

Uzyskane wyniki badań współczynnika tarcia dla części stalowych przedstawiono w tabeli 8.

Tabela 8. Wyniki pomiaru współczynnika tarcia powłok cynkowych

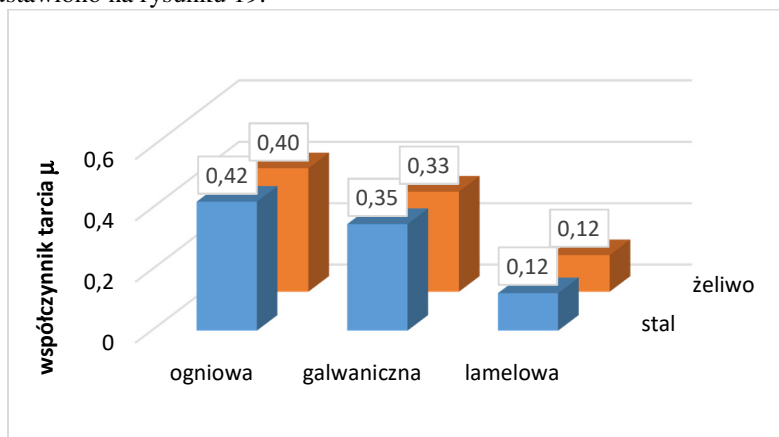
Powłoka	Współczynnik tarcia powłok cynkowych ( $\mu$ ) dla stali					Średnia
	1	2	3	4	5	
ogniowa	0,40	0,44	0,39 min	0,43 max	0,46 max	<b>0,42</b>
galwaniczna	0,35	0,34 min	0,35 max	0,36	0,35	<b>0,35</b>
lamelowa	0,12	0,12 min	0,13 max	0,13	0,12	<b>0,12</b>

Uzyskane wyniki badań współczynnika tarcia dla części żeliwnych przedstawiono w tabeli 9.

Tabela 9. Wyniki pomiaru współczynnika tarcia powłok cynkowych

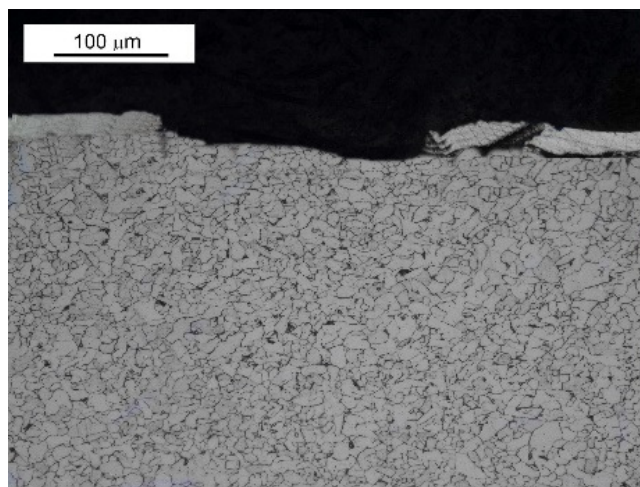
Powłoka	Współczynnik tarcia powłok cynkowych ( $\mu$ ) dla żeliwa					Średnia
	1	2	3	4	5	
ogniowa	0,42 max	0,40	0,39 min	0,40	0,41	<b>0,40</b>
galwaniczna	0,32 min	0,33 max	0,33	0,33	0,33	<b>0,33</b>
lamelowa	0,11 min	0,11	0,12 max	0,12	0,12	<b>0,12</b>

Średnie wartości współczynnika tarcia  $\mu$  dla wszystkich trzech rodzajów powłok przedstawiono na rysunku 19.



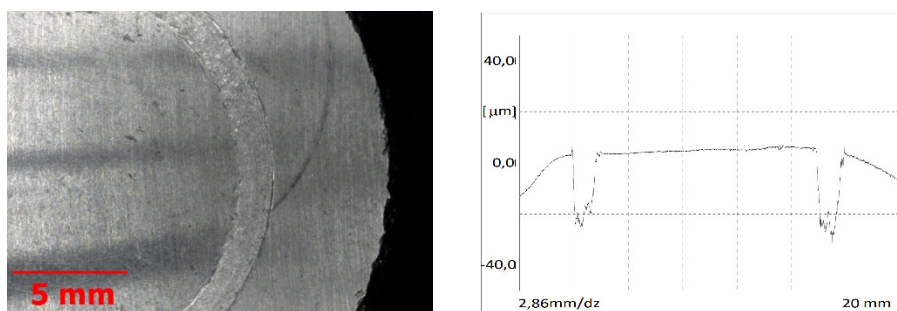
Rysunek. 19. Średnia zmierzona wartość współczynnika tarcia dla analizowanych powłok

Przykładowa mikrostruktura w obrębie uszkodzenia powłoki galwanicznej naniesionej na części stalowe została przedstawiona na rysunku 20.

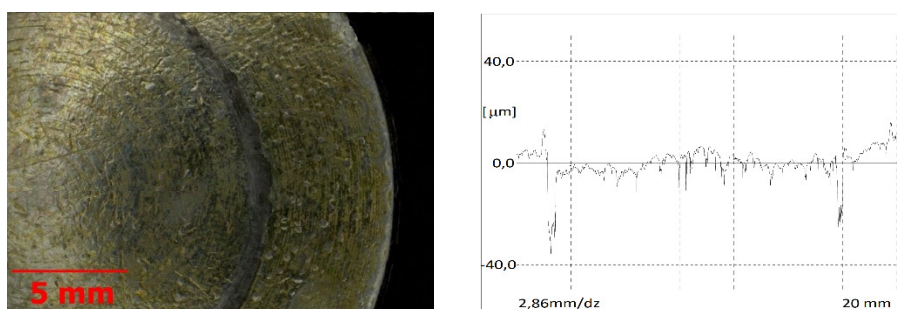


Rysunek 20. Mikrostruktura uszkodzonej powłoki galwanicznej dla części stalowej po przeprowadzonych badaniach tribologicznych

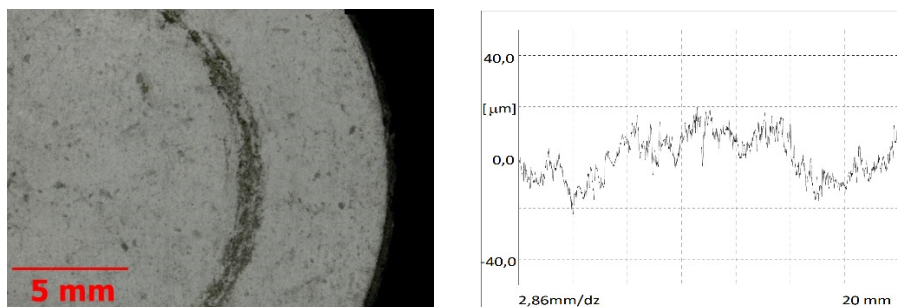
Dodatkowo w celu wyznaczenia głębokości uszkodzenia powłoki zmierzono maksymalną głębokość wgłębienia profilu chropowatości – Rv. Wyniki obserwacji i pomiarów przedstawiono na rysunkach 21-23.



Rysunek 21. Widok powierzchni stalowej próbki z naniesioną powłoką ogniową oraz wykres profilu chropowatości powłoki w miejscu tarcia



Rysunek 22. Widok powierzchni stalowej próbki z naniesioną powłoką galwaniczną oraz wykres profilu chropowatości powłoki w miejscu tarcia



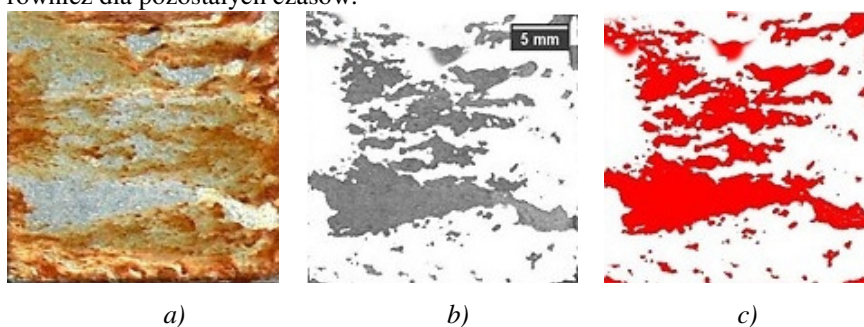
Rysunek 23. Widok powierzchni stalowej próbki z naniesioną powłoką lamelową oraz wykres profilu chropowatości powłoki w miejscu tarcia

W celu określenia odporności korozyjnej naniesionych powłok przeprowadzono badania w komorze solnej. Wygląd części w trakcie badań pokazano na rysunku 24.



Rysunek 24. Wygląd części uchwytów w komorze solnej

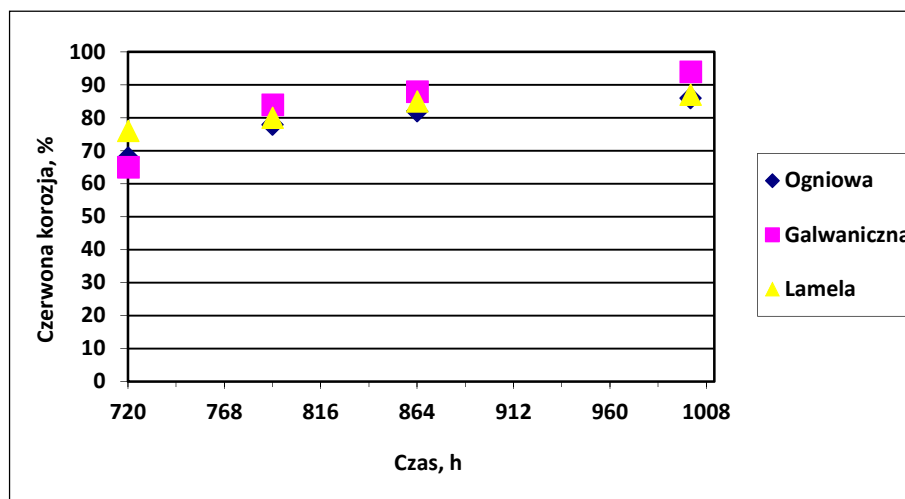
Uzupełnieniem badań korozyjnych była komputerowa analiza obrazu powłok cynkowych mająca na celu liczbowe określenie stopnia korozji. Na rysunku 25 przedstawiono kolejne etapy komputerowej analizy obrazu na przykładzie próbki po 720 godzinach testu korozyjnego. Analiza obrazu powierzchni była prowadzona również dla pozostałych czasów.



Rysunek 25. Kolejne etapy analizy zdjęć z powierzchni próbek stalowych poddawanych testowi korozyjnemu: a) zdjęcie wejściowe, b) widok w odcieniach szarości po zaznaczeniu obszaru skorodowanego (na białym tle), c) widok po zaznaczeniu obszaru objętego korozją czerwoną (na białym tle)



Przeprowadzona komputerowa analiza obrazu umożliwiła określenie procentowego udziału powierzchni objętej tzw. „korozją czerwoną”. Wyniki przedstawiono na rysunku 26 w formie wykresu.



Rysunek 26. Przebieg korozji próbek stalowych po cynkowaniu wyrażona w procentach powierzchni objętej przez „korozję czerwoną”

### 3. Analiza wyników badań

Przedstawione wyniki badań charakteryzują właściwości tribologiczne, a tym samym właściwości użytkowe trzech najpopularniejszych powłok ochronnych stosowanych m.in. w przemyśle energetycznym. Po nałożeniu powłok cynkowych dokonano w pierwszym etapie badań pomiaru topografii powierzchni. Największą chropowatość zanotowano dla powłok otrzymanych metodą zanurzeniową – dla stali było to 2,53  $\mu\text{m}$ , a dla części z żeliwa szarego 2,59  $\mu\text{m}$ . Dla powłoki lamelowej były to wartości pośrednie i wyniosły one odpowiednio 0,95  $\mu\text{m}$  dla stali i 0,99  $\mu\text{m}$  dla żeliwa. Najmniejszą wartość chropowatości zmierzono dla powłoki galwanicznej. Dla obu przypadków była to wartość równa 0,2  $\mu\text{m}$ . Na podstawie przeprowadzonych obserwacji mikroskopowych jednoznacznie można stwierdzić, że badane powłoki cynkowe charakteryzują się typową, zgodną z normami [15-17] budową oraz grubością. Na podstawie przeprowadzonych pomiarów grubości badanych powłok cynkowych, stwierdzono że największą grubość powłoki uzyskano w przypadku cynkowania ogniowego. Średnia arytmetyczna grubości powłoki wyniosła 89,7  $\mu\text{m}$  dla stali, a w przypadku żeliwa było to 96,7  $\mu\text{m}$ . Dla powłoki galwanicznej średnia wartość grubości to 18,6  $\mu\text{m}$  dla stali i 19,9  $\mu\text{m}$  dla żeliwa. Najmniejszą grubość uzyskano w przypadku powłok lamelowych i wyniosła ona 9,4  $\mu\text{m}$  dla stali oraz 10,8  $\mu\text{m}$  dla żeliwa. Nieznaczny wzrost grubości otrzymanych powłok na częściach żeliwnych wynika ze stanu powierzchni przed procesem cynkowania. Dane przedstawione w literaturze [4] wskazują, że chropowatość powierzchni powłok oraz jej twardość mogą wpływać na ich właściwości użytkowe. Uważa się, że zbyt duża

chropowatość powoduje obniżenie odporności korozyjnej i zmniejszenie właściwości mechanicznych. Ze względu na budowę warstwową i obecność czystego cynku w warstwie zewnętrznej najmniejszą odporność w warunkach tarcia suchego wykazały powłoki cynkowe otrzymane metodą ogniową. Współczynnik tarcia dla tego rodzaju powłoki wyniósł 0,42 dla części stalowych i 0,40 dla części żeliwnych. Zmniejszoną wartość współczynnika tarcia uzyskano dla powłoki galwanicznej i wyniósł on odpowiedni dla stali 0,35, dla żeliwa 0,33. Dodatkowe badania mikroskopowe stanu powierzchni analizowanej próbki wykazały, że nastąpiło całkowite usunięcie warstwy cynku w miejscu kontaktu z przeciwpróbką. Największą odpornością na zużycie cierne charakteryzowały się powłoki lamelowe. Średni arytmetyczny współczynnik tarcia w oby przypadkach wyniósł tutaj 0,12.

Uzupełnieniem badań tribologicznych był pomiar twardości powłok cynkowych. Największą twardością, a tym samym odpornością na uszkodzenia mechaniczne cechują się części, na których naniesiono powłoką lamelową. Średnia zmierzona głębokość penetracji wgłębnika wyniosła dla stali i żeliwa 0,8  $\mu\text{m}$ . Dla powłoki ogniowej oraz galwanicznej głębokość penetracji wgłębnika wyniosła 1,2-1,38  $\mu\text{m}$ . W przypadku powłok cynkowych które zostały naniesione na powierzchnię żeliwa szarego zmierzono niższy współczynnik tarcia oraz mniejszą wartość głębokości penetracji wgłębnika. Jednocześnie przeprowadzone obserwacje mikroskopowe wykazały, że grafit z warstwy wierzchniej żeliwa może penetrować w głąb powłoki cynkowej, co może być przyczyną uzyskanych wyników.

Komputerowa analiza obrazu umożliwiła ilościowe określenie obszaru objętego tzw. „czerwoną korozją”. W początkowej fazie badania (0÷720 h) zaobserwowano, że w przypadku powłoki lamelowej powierzchnia objęta korozją była największa i równa była 76%. W przypadku powłoki galwanicznej i ogniowej powierzchnia objęta „korozją czerwoną” była podobna i wyniosła 65%. W kolejnych etapach badania w komorze solnej powierzchnia objęta korozją powiększyła się, ale nie zauważono większych różnic w zależności od zastosowanego rodzaju pokrycia. Dla przedziału czasu 720÷792 h wynosi 84% dla powłoki galwanicznej, 78% dla powłoki ogniowej, a dla lamelowej 80%. Proces korozji w przedziale czasowym 792÷864 h przebiegał mniej intensywnie. Dla powłoki galwanicznej obszar objęty korozją zwiększył się o kolejne 4%. W przypadku powłoki lamelowej był to wzrost o 5% a dla powłoki ogniowej o 4%. W ostatnim przedziale czasu 864÷1000 h powierzchnia, na której uwzględniono korozję czerwoną wyniosła: powłoka galwaniczna 94%, powłoka lamelowa 87% i powłoka ogniowa 86%.

#### 4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Z przeprowadzonych badań odporności korozyjnej wynika, że największą odporność wykazują powłoki ogniowa i lamelowa.
- W trakcie badań w komorze solnej zaobserwowano, że proces korozji ulega spowolnieniu po upływie 792 godzin.
- Grubość powłoki cynkowej nie decyduje o jej odporności na działanie środowiska korozyjnego.

- Przeprowadzone badania tribologiczne wykazały że największą odpornością na zużycie cierne charakteryzują się powłoki lamelowe.
- Powłoka lamelowa odznacza się zwiększoną twardością wyrażoną poprzez głębokość penetracji wgłębnika w porównaniu do powłoki zanurzeniowej i galwanicznej.
- Powłoka galwaniczna oraz ogniowa charakteryzują się zbliżonymi parametrami zużycia ciernego.
- W wyniku przeprowadzonych badań tribologicznych stwierdzono całkowite usunięcie powłoki galwanicznej w miejscu kontaktu z przeciwpóbką.
- W trakcie obserwacji mikroskopowych zaobserwowano, że grafit penetruje w głąb powłoki cynkowej.

## LITERATURA

1. LITWIN M., GÓRECKI M.: Błędy wykonawcze podczas realizacji konstrukcji stalowych. *Budownictwo i Architektura*, **4**(2009), 63-72.
2. KONSTANTINOV V., BULOICHYK I.: Some aspects of sherardizing implementation during anticorrosion protection of heat treated metal parts. *IOP Materials Science and Engineering*, **71**(2015), No. 012063 .
3. JANKA R., PIETKUN I., PIETROV L., PIETRZAK R.: Wpływ elektrolitycznego wodorowania na korozyjne właściwości stali. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Opolskiego. Inżynieria Procesowa w Ochronie Środowiska*, **23**(2006), 95-101.
4. KOT M., RAKOWSKI W.: Wpływ chropowatości powierzchni i twardości podłoża na pomiar twardości cienkich warstw. *Zagadnienia eksploatacji maszyn*, **40**(2005), 17-30.
5. SONNTAG B., THOM K., DAMBROWSKY N., DINGWERTH B.: Zinc-Nicel electroplating - Best Suited. Electrolytes for a diversity of applications. *Galvanotechnik*, **7**(2009), 1499-1513.
6. FAYOMI O., POPOOLA A.: Comparative studies of microstructural, tribological and corrosion properties of plated zinc and zinc - alloy coatings. *International Journal of Electrochemical Science*, **7**(2012), 6555-6570.
7. SCHULTZ W., THIELE M.: Cynkowanie ogniowe jednostkowe. *Materiał. Technologia. Powstawanie powłok. Właściwości. Błędy. Bad Saulgau: Eugen G. Leuze Verlag KG*, 2012.
8. SOKULSKI W.: Ochrona elektrochemiczna - cel, efekt, skutki zaniedbań. *Inżyniera Powierzchni*, **1**(2007), 29-33.
9. SCHAEFER K.: Ocena degradacji organicznych powłok ochronnych w oparciu o metody mikroskopowo – impedancyjne. Gdańsk, Politechnika Gdańska, 2013.
10. BIERWAGEN G., TALLMAN D., LI J., HE L., JEFFCOATE C.: EIS of coated metals in accelerated exposure. *Prog. Org. Coat.*, 2003, 148-157.
11. SKOTNICKI W., JĘDRZEJCZYK D., SZŁAPA I.: Comparative study of zinc coating tribological properties in dry friction conditions. *Metal 2016, Brno, Czechy*, 2016.
12. SZŁAPA I., JĘDRZEJCZYK D., SKOTNICKI W.: Zróżnicowane odporności na korozję i zużycie tribologiczne powłok cynkowych nanoszonych na żeliwo. *Ochrona przed korozją*, **4**(2015), 132-139.

13. PN-EN 10263-4:2018-01: Walcówka stalowa, pręty i drut do spęczania i wyciskania na zimno. Część 4: Warunki techniczne dostawy stali do ulepszania cieplnego.
14. PN-EN ISO 10684:2006: Części złączne - Powłoki cynkowe nanoszone metodą zanurzeniową.
15. PN-EN ISO 4042:2018-11: Części złączne - Powłoki elektrolityczne.
16. PN-EN ISO 10683:2018-11: Części złączne - Nielektrolityczne płatkowe powłoki cynkowe.
17. PN-EN ISO 14577-1:2015-09: Metale - Instrumentalna próba wciskania wgłębnika do określania twardości i innych własności materiałów. Część 1: Metoda badania.
18. PN-EN ISO 9227:2017-06: Badania korozyjne w sztucznych atmosferach - Badania w rozpylonej solance.