

ROSTISLAV FAJKOŠ, RADIM ZIMA\*, KRZYSZTOF KARWAŁA\*\*

## METODY OCENY JAKOŚCI SYSTEMÓW POWŁOKOWYCH DLA OCHRONY POWIERZCHNIOWEJ KOLEJOWYCH ZESTAWÓW KOŁOWYCH

---

### METHODS FOR QUALITY EVALUATION OF PAINT COATING SYSTEMS FOR RAILWAY WHEEL SET SURFACE PROTECTION

#### Streszczenie

W opracowaniu przedstawiono metody oceny jakości systemów powłokowych ochrony powierzchniowej, kompleksową metodykę badań oraz wyniki badań jakości technologicznej kolejowych zestawów kołowych realizowanych w wytwórni zestawów kołowych BONATRANS GROUP a.s. w Boguminie. Przeprowadzone badania jakości technologicznej elementów zestawów kołowych potwierdziły pozytywny wpływ wybranych powłok ochrony powierzchniowej na jakość użytkową kolejowych zestawów kołowych.

*Słowa kluczowe: zestaw kołowy, jakość technologiczna, powłoki ochrony powierzchniowej*

#### Abstract

In the paper the methods for quality evaluation of surface protection paint coating systems, the complex research methodology as well as the quality investigation results of railway wheel set production technology quality carried out in Wheel Set Factory BONATRANS GROUP a.s., Bohumin were presented. The quality investigations of the railway wheel set element production technology proved a positive influence of the selected surface protection paint coatings on the functional quality of railway wheel sets.

*Keywords: wheel set, production technology quality, surface protection paint coatings*

---

\* Rostislav Fajkoš, Radim Zima, Bonatrans Group a.s, Bogumin.

\*\* Dr inż. Krzysztof Karwala, Instytut Pojazdów Szynowych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Krakowska.

## 1. Wstęp

Prowadzenie działalności gospodarczej w warunkach globalizacji i międzynarodowego podziału pracy powoduje, iż zaspokojenie potrzeb i oczekiwań klienta w dziedzinie przewozów ludzi oraz towarów staje się najwyższym nakazem firmy. Znacząca rola w tym zakresie przypada dla sprawnego i nowoczesnego transportu szynowego, który jest obecnie wiodącym systemem transportu towarów i ludzi na duże odległości. Nowoczesne pojazdy szynowe powinny spełniać wiele kryteriów dotyczących budowy eksploatacji i ekologii. W celu podwyższenia efektywności i produktywności transportu szynowego w eksploatacji dąży się więc do zwiększenia prędkości jazdy, wzrostu ładowności oraz podwyższenia mocy pojazdów trakcyjnych, szczególnie w transporcie towarowym. Zadania eksploatacyjne, jakie stawia się współcześnie wytwarzanym pojazdom szynowym w większości państw europejskich, wiążą się z koniecznością wytwarzania środków transportu szynowego o wysokiej trwałości i niezawodności. Zwiększenie trwałości elementów pojazdów szynowych można osiągnąć poprzez zastosowanie bardziej odpornych na zużycie materiałów lub podwyższenie własności użytkowych materiałów tradycyjnymi metodami technologicznymi, co jest korzystniejsze ze względów ekonomicznych. Jednym z zespołów pojazdu szynowego, którego wysoka jakość użytkowa jest warunkiem koniecznym dla zapewnienia bezpieczeństwa ruchu kolejowego, jest zestaw kołowy. Zapewnia on współpracę pojazdu szynowego z torem, stąd jego bezpośredni wpływ zarówno na bezpieczeństwo ruchu, jak również na część kosztów związanych z eksploatacją pojazdu szynowego. Aktualnie obowiązujące w Europie normy EN13260 EN13261, EN13262, kompleksowo określają wymagania dotyczące zestawów kołowych. Ze względu na złożony charakter obciążenia zestawu kołowego wiodącymi procesami zużycia są: zużycie zmęczeniowe oraz ścierne. Istotnym zagadnieniem, którego znaczenie rośnie w miarę podwyższania prędkości jazdy pojazdów szynowych, jest uzyskanie odpowiednio wysokiej wytrzymałości zmęczeniowej oraz odporności na zużycie ścierne elementów zestawu kołowego. Celowe jest zatem podwyższanie ich własności użytkowych metodami technologicznymi. Wysoka jakość technologiczna systemów powłokowych ochrony powierzchni ma określony wpływ na bezpieczeństwo ruchu pojazdu, eliminując powierzchniowe uszkodzenia warstwy wierzchniej elementów zestawu kołowego co korzystnie wpływa na ich trwałość oraz zapewnia estetyczny wygląd zestawu kołowego.

W niniejszym opracowaniu przedstawiono metody oceny jakości systemów powłokowych ochrony powierzchniowej, kompleksową metodykę badań oraz wyniki badań jakości technologicznej elementów kolejowych zestawów kołowych produkowanych w wytwórni zestawów kołowych BONATRANS GROUP a.s. w Boguminie.

## 2. Rola warstwy powierzchniowej w kształtowaniu jakości technologicznej elementów zestawów kołowych pojazdów szynowych

Spełnienie złożonych wymagań stawianych elementom zestawów kołowych jest możliwe przy zapewnieniu wysokiej jakości technologicznej ich wykonania. Jest ona determinowana m.in. ich wytrzymałością zmęczeniową i odpornością na zużycie ścierne. Wymienione własności użytkowe w szerokim zakresie mogą być kształtowane metodami technologicznymi przy określonej konstrukcji i warunkach eksploatacji. Ostateczne ukształtowanie jakości technologicznej wyrobu odbywa się w końcowej fazie procesu technologicznego poprzez

nadanie jego warstwie powierzchniowej określonych własności za pomocą odpowiednich procesów technologicznych. Całokształt działań inżynierskich w tym zakresie, obejmujących projektowanie, realizację i kontrolę procesów technologicznych, wchodzi w zakres wyodrębnionej dziedziny wiedzy – inżynierii powierzchni [1]. W inżynierii powierzchni warstwa powierzchniowa obejmuje zarówno pojęcie warstwy wierzchniej, jak i powłoki.

Warstwą wierzchnią nazywamy warstwę materiału ograniczoną rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, obejmującą tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni rzeczywistej, która wykazuje zmienione cechy fizyczne i niekiedy chemiczne w stosunku do cech tego materiału w głębi przedmiotu [2].

Przez technologiczną warstwę wierzchnią należy rozumieć warstwę wierzchnią świadomie i celowo ukształtowaną wybranymi procesami technologicznymi w celu uzyskania żądanych własności użytkowych [3]. Warstwa wierzchnia odgrywa przede wszystkim rolę techniczną. Stawia się przed nią wysokie wymagania dotyczące zwiększenia trwałości eksploatacyjnej części maszyn pracujących w warunkach tarcia i obciążeń zmęczeniowych, często przy korozyjnym oddziaływaniu środowiska naturalnego.

Powłoką nazywamy warstwę materiału o odmiennym od podłoża składzie chemicznym nanoszoną metodami technologicznymi na powierzchnię elementów maszyn w celu nadania im właściwości funkcjonalnych i estetycznych [4]. Powłoki odgrywają przede wszystkim rolę ochronną, zabezpieczając materiał podłoża przed różnymi rodzajami korozji, jak również przed mechanicznymi uszkodzeniami powierzchni elementów maszyn. Przy okazji mogą spełniać również rolę dekoracyjną. W celach technicznych stosowane są głównie do poprawy własności trybologicznych oraz do celów regeneracyjnych. Znaczenie powłok w technice wynika głównie z ich roli antykorozyjnej.

Wartość użytkowa warstwy powierzchniowej jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o zdolności do spełniania wymogów eksploatacyjnych produktu [5]. Jest ona związana z jakością materiału, dokładnością wymiarowo-kształtową oraz jakością warstwy powierzchniowej wyrobu. Rozwój inżynierii powierzchni w kierunku projektowania, wytwarzania, badania i eksploataowania warstw powierzchniowych, umożliwia odpowiedni ich dobór do warunków eksploatacji wyrobu. Prawidłowo dobrana i wykonana warstwa powierzchniowa umożliwia uzyskanie następujących korzyści:

- zwiększenie niezawodności pracy części maszyn i zmniejszenie ich awaryjności, co skutkuje zmniejszeniem częstotliwości remontów i wymiany zużytych elementów, w wyniku ich niewłaściwej konstrukcji i eksploatacji odnotowuje się ok. 15% awarii, natomiast w wyniku niewłaściwie dobranych lub wadliwie wykonanych warstw powierzchniowych występuje ok. 85% awarii [6],
- zwiększenie trwałości elementów maszyn poprzez zmniejszenie oporów tarcia oraz zwiększenie odporności na zużycie ściernie,
- zastąpienia z porównywalnym skutkiem drogich materiałów tańszymi o gorszych właściwościach użytkowych i nadawanie ich powierzchni fizycznej lepszych właściwości eksploatacyjnych co może prowadzić do zmniejszenia ich masy przy tych samych właściwościach wytrzymałościowych i zwykle lepszych właściwościach trybologicznych,
- zmniejszenie strat energii na pokonywanie oporów tarcia w wyniku zmniejszenia się mas poruszających się części i na skutek poprawy własności trybologicznych powierzchni trących, na pokonywanie oporów tarcia przeciętnie zużywa się ok. 15–25% doprowadzanej energii, a w niektórych gałęziach aż do 85% [1],
- zmniejszenie strat w gospodarce narodowej spowodowanych korozją stopów żelaza,

- zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego w wyniku zastąpienia energochłonnych technologii wytwarzania technologiami energooszczędnymi przyjaznymi ekologicznie.

Odpowiednio dobrane do warunków eksploatacji części maszyn technologiczne warstwy powierzchniowe pozwalają na znaczne przedłużenie ich trwałości eksploatacyjnej, zwłaszcza jeżeli chodzi o trwałość trybologiczną, co bezpośrednio wpływa na wzrost jakości użytkowej elementów maszyn.

### **3. Metody oceny jakości systemów powłokowych ochrony powierzchniowej kolejoowych zestawów kołowych stosowane w zakładach BONATRANS GROUP a.s. w Boguminie**

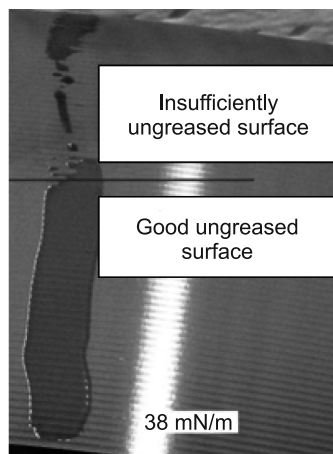
Ze względu na fakt, iż o jakości użytkowej powłok ochrony powierzchniowej w zasadniczym stopniu decyduje adhezja, czyli siła przylegania powłoki do podłoża, zasadnicze znaczenie ma odpowiednie przygotowanie powierzchni przed naniesieniem systemu powłokowego. Aby otrzymać wymaganą jakość powłoki naniesionej na elementy zestawu kołowego, należy bardzo dokładnie odtłuścić powierzchnię i sprawdzić jej jakość po zakończeniu procesu odtłuszczania. W zakładzie BONATRANS GROUP a.s. wykorzystuje się, w zależności od stosowanej technologii, różne środki do odtłuszczania powierzchni elementów zestawów kołowych. Realizację procesu odtłuszczania powierzchni można realizować ręcznie lub automatycznie, jeżeli urządzenie do odtłuszczania znajduje się końcowej części procesu obróbki wykańczającej elementów zestawów kołowych. Po zakończonym procesie odtłuszczania konieczne jest usunięcie resztek środków odtłuszczających za pomocą mycia powierzchni odtłuszczanych.

#### **3.1. Ocena jakości odtłuszczonej powierzchni przed nałożeniem systemu powłokowego**

Warunkiem koniecznym do osiągnięcia wymaganej jakości systemu powłokowego jest prawidłowe odtłuszczenie powierzchni. Ocena jakości przygotowania powierzchni do naniesienia powłoki przeprowadzana jest z zadaną częstotliwością badań, z zastosowaniem atramentów testowych lub za pomocą elektronicznego testu o oznaczeniu OKO-Mobil.

Badanie za pomocą atramentów testowych naprężeń powierzchniowych ARCOTEST jest zalecane jako badanie rutynowe dla pracowników produkcyjnych. Wynik jest od razu widoczny, zweryfikowany i daje bardzo dokładny wskaźnik o stopniu odtłuszczenia i czystości powierzchni.

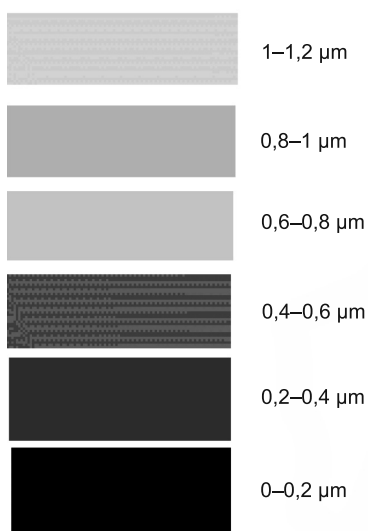
Badanie przeprowadza się poprzez naniesienie atramentu testowego na powierzchnię materiału – odcinek około 5 cm. Jeżeli kreska atramentu na powierzchni materiału nie zmieni się po upływie dwóch sekund, tzn. nie zamieni się w krople, naprężenia powierzchniowe są takie same albo nawet większe niż napięcie powierzchniowe roztworu-atramentu. Aby powierzchnia była przygotowana właściwie, atrament o wartości napięcia powierzchniowego 38 mN/m musi stanowić spójną warstwę i spełniać warunki badawcze. Na rysunku 1 przedstawiono badanie odtłuszczonej powierzchni za pomocą atramentu testowego ARCOTEKST.



Rys. 1. Badanie odtłuszczonej powierzchni za pomocą atramentu testującego – na podstawie napięć powierzchniowych

Fig. 1. Test of ungreased surface according tested ink – on the basis of stress-surface intensity

Badanie za pomocą urządzenia OKO-Mobil przeprowadza się poprzez przyłożenie urządzenia do odtłuszczonej powierzchni. Potem urządzenie wyświetli kolorowe spektrum, przedstawione na rysunku 2, w którym powinno znajdować się co najmniej 90% czarnego koloru i najwyżej około 10% granatowego (ciemnoniebieskiego) – wskazujące bardzo małe zanieczyszczenia.



Rys. 2. Widok na skalę testowanego urządzenia Oko-mobil sygnalizującą jakość powierzchni odtłuszczonej

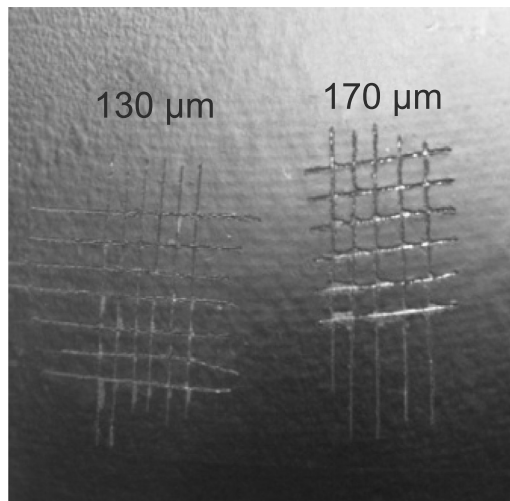
Fig. 2. A view on scale tested instrument Oko-Mobil indicating a quality of ungreased surface

Jeśli po odtłuszczeniu nie otrzymano żądanej jakości powierzchni, konieczne jest powtórzenie procesu odtłuszczania elementu w celu osiągnięcia żądanej adhezji nanoszonego systemu powłokowego.

### 3.2. Ocena jakości systemu powłokowego przeprowadzona bezpośrednio w procesie produkcyjnym po naniesieniu powłoki na element zestawu kołowego

Jakość naniesionej powłoki po zakończeniu procesu technologicznego jej nakładania możemy sprawdzić, oceniając trzy wybrane parametry: przyczepność do podłoża, grubość i jednolitość jej nałożenia oraz ogólny wygląd nałożonej powłoki.

Ocenę przyczepności powłoki do podłoża oceniamy za pomocą metody siatkowej, która polega na próbie oddzielenia pociętej pod kątem prostym powłoki od podłoża, na które jest naniesiona. Szczegółowy opis tej metody znajduje się w normie CSN ISO 2409. Na rysunku 3 przedstawiono widok badanego metodą siatkową segmentu osi.



Rys. 3. Siatkowa metoda oceny jakości przyczepności systemu powłokowego

Fig. 3. Crosscut test for evaluation a quality adhesion of painting system

Ocenę grubości i jednolitości naniesionej powłoki oceniamy za pomocą ultradźwiękowych lub indukcyjnych grubościomierzy. Ogólny wygląd nałożonej powłoki oceniamy, stosując metody mnemotechniczne, np. wygląd, odcień, które oceniamy przez porównanie z odpowiednim wzornikiem.

### 3.3. Wymagania normy EN 13261 dotyczące klasyfikacji i badań systemów powłokowych

Systemy powłokowe możliwe do zastosowania dla osi kolejowych określa norma EN 13261. Wymieniona norma zawiera 4 kategorie według żądanej ochrony powierzchni oraz konieczne badania potwierdzające jakość nałożonej powłoki. Stosunkowo duże wymagania odnoszą się do systemów powłokowych klasy 1, która dotyczy systemów powłoko-

wych nakładanych na osie zestawów kołowych stosowanych do prędkości przekraczającej 200 km/godz. Przy wysokich prędkościach ruchu zestaw kołowy jest narażony na zwiększone obciążenia mechaniczne oraz uszkodzenia mechaniczne od podtorza, które powstają przy dużych prędkościach ruchu pojazdu. Klasyfikację oraz wymagane badania systemów powłokowych osi kolejowych przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

**Klasyfikacja oraz badania systemów powłokowych osi kolejowych wg normy 13261 [7]**

	Klasa 1	Klasa 2	Klasa 3	Klasa 4
Grubość powłoki	X	X	X	–
Przyczepność powłoki	X	X	X	–
Odporność na uderzenia	X	–	–	–
Odporność na zwirowanie	X	X	X	–
Odporność na mgły solne	X	X	X	–
Odporność na szczególne produkty korozyjne	–	X	–	–
Odporność na cykliczne mechaniczne obciążenie	X	X	X	–

Systemy powłokowe stosowane dla ochrony powierzchniowej osi zestawów kołowych przeznaczonych dla dużych prędkości ruchu., charakteryzują się zwiększoną grubością nałożonej powłoki. Grubość powłoki stosowana do osi zestawów przeznaczonych dla prędkości niższych niż 200 km/godz. wynosi około 200  $\mu\text{m}$ , grubość powłoki stosowana dla osi zestawów do dużych prędkości wynosi minimum 4,5 mm i jest nanoszona specjalną technologią. Taka powłoka musi zabezpieczyć nie tylko odporność korozyjną, ale również musi chronić oś przed narażeniami mechanicznymi, tj. uderzeniami kamieni, żwiru itp., które są wzniesane z podłoża przy wysokich prędkościach ruchu. W praktyce eksploatacyjnej w czasie uderzenia odłamków kamieni i żwiru na niechronioną powierzchnię zauważono zmęczeniowe pęknięcia w miejscach osi, gdzie doszło do uszkodzenia takim odłamkiem, warstwy wierzchniej i powstało powierzchniowe ognisko zmęczeniowe, które w dalszej eksploatacji może doprowadzić do zmęczeniowego złamania osi. Przy zabezpieczonej odpowiednią powłoką ochrony powierzchniowej osi, jeżeli uderzenie odprysku kamienia naruszy ciągłość powłoki, w miejscu uderzenia może powstać ognisko korozji powierzchniowej, która – rozwijając się w eksploatacji – może doprowadzić do złamania osi. Na rysunku 4 przedstawiono zdjęcie z wypadku we włoskim Viareggio w 2009 roku, gdzie pod wpływem korozji wżerowej osi, która wyraźnie zapoczątkowała pęknięcia zmęczeniowe i spowodowała złamanie zmęczeniowe osi kolejowej w wagonie zbiornikowym przewożącym gaz ziemny (LPG), który spowodował tragiczne następstwa, ponieważ zginęli ludzie oraz duże szkody materialne, które spowodował wybuch gazu w terenie zabudowanym.





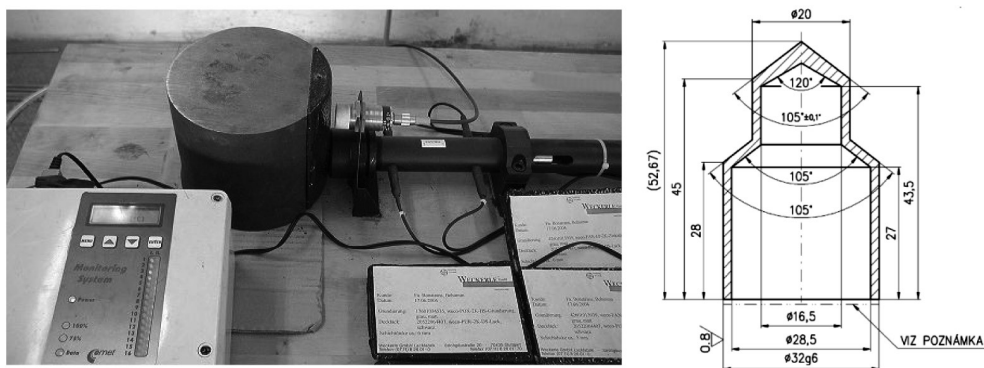
Rys. 4. Widok na pękniętą oś w miejscu korozji powierzchniowej osi, która spowodowała wykolejenie wagonu cysterny we włoskim Viareggio

Fig. 4. A view on axle fracture on corrosion impact surface axle journal which cause a vehicle derailment of railway tank on Italian Viareggio

### 3.3.1. Próba odporności powłoki na uderzenia mechaniczne

Wykonanie tej próby potwierdza jakość powłoki w ochronie powierzchni osi przed narażeniami mechanicznymi. Badana powłoka musi posiadać zdolność pochłaniania energii uderzenia i niedopuszczenia do przzerwania powłoki oraz uszkodzenia warstwy wierzchniej osi.

Próba ta polega na wystrzeleniu stalowego naboju o masie 60 g na powierzchnię segmentu osi, na którą naniesiono ochronną warstwę powłoki, prędkością 19,4 m/s (70 km/h), energia uderzenia naboju wynosi 11,3 J. Na rysunku 5 przedstawiono widok urządzenia testowego oraz naboju stosowanego do próby odporności systemu powłokowego na uderzenia.



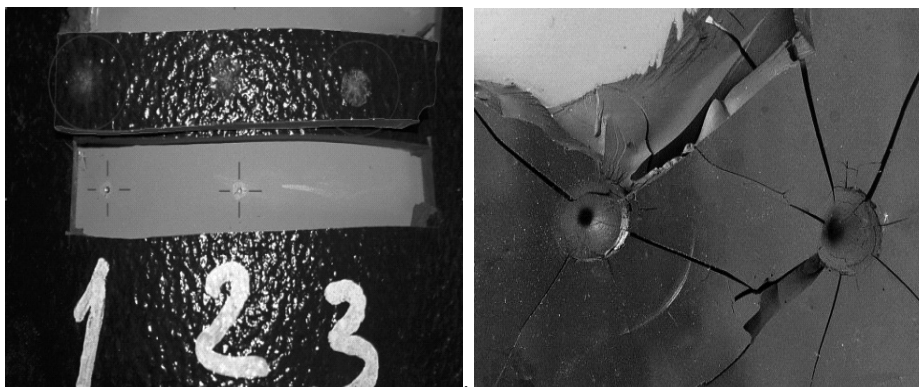
Rys. 5. Widok urządzenia testowego oraz naboju wykorzystywanego do próby odporności systemu powłokowego na uderzenia

Fig. 5. A view on projectile and testing equipment used for impact test of painting system

Celem próby jest znalezienie najmniejszej wymaganej grubości powłoki, która uniemożliwi przedostanie się naboju do warstwy wierzchniej segmentu osi. Po konsultacji z firmą Weckerle Lackfarick GmbH, która jest producentem stosowanego systemu powłokowego, usta-



lono przeprowadzenie tego rodzaju prób w temperaturze pokojowej i temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$ . W temperaturze pokojowej nie dochodziło do przedostania się naboju do warstwy wierzchniej osi i na powierzchni systemu powłokowego widzano tylko mały punkt po naboju, natomiast w temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$  nastąpiło całkowite zniszczenie systemu powłokowego w pierwszych testowanych próbkach pod wpływem ich skruszenia w wyniku niskiej temperatury. Na rysunku 6 przedstawiono fotodokumentację wyników badań grubowarstwowego systemu powłokowego. Zdjęcie lewe przedstawia wyniki badań osi z naniesionym grubowarstwowym systemem powłokowym. Po usunięciu systemu powłokowego widoczne są miejsca uderzenia naboju (oznaczony cyfrą 1 widoczny ślad uderzenia naboju). Zdjęcie prawe przedstawia negatywne wyniki badań systemu powłokowego testowanego w ujemnej temperaturze.



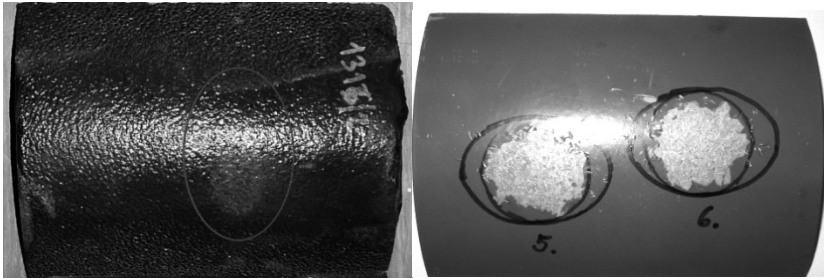
Rys. 6. Próba odporności systemu powłokowego na uderzenia (na lewo mała grubość systemu powłokowego, dlatego nabój przedostał się do segmentu osi, na prawo zniszczony system powłokowy w temperaturze  $-25^{\circ}\text{C}$ )

Fig. 6. Impact test of painting system (in left fig. is small thickness of painting system because the projectile broke into tested segment of axle, in right fig. is destruction of painting system during test on temperature 25 degree below zero)

### 3.3.2. Próba odporności na zwirowanie

Przeprowadzenie wymienionej próby weryfikuje odporność systemu powłokowego na narażenia mechaniczne pochodzące od podtorza podczas ruchu pojazdu. Badania symulacyjne wpływu dolatującego piasku lub drobnego żwiru na ochronną powłokę osi w czasie eksploatacji przeprowadza się w następujący sposób: na badaną próbkę osi wysypuje się 1 kilogram stalowych nakrętek M6 z wysokości 5 metrów. Swobodne spadanie nakrętek jest prowadzone w stalowej rurze o wewnętrznej średnicy 38 mm. Ocenia się procentowy stosunek uszkodzonego w badaniach systemu powłokowego i porównuje się z tabelką poziomu uszkodzenia powłoki. System powłokowy można potem zaszeregować odpowiedniej klasy ochrony zdefiniowane w EN 13261. Na rysunku 7 przedstawiono fotodokumentację wyników badań odporności wybranych powłok ochronnych na zwirowanie. Segment lewy przedstawia powierzchnię powłoki o grubości 4,5 mm. Analizując wyniki badań stwierdzono brak jakichkolwiek uszkodzeń na badanej powierzchni. Pozwala to na zaliczenie tej powłoki do klasy 1 ze względu na odporność na zwirowanie. Segment prawy przedstawia powierzchnię powłoki o grubości 200  $\mu\text{m}$ . Analizując wyniki badań, stwierdzono uszkodzenie badanej

powłoki prawie na całej powierzchni, co daje negatywny wynik odporności badanej powłoki na zwirowanie. Badania na odporność powłok na zwirowanie przeprowadzono dla kilku stosowanych aktualnie na kolejach powłok o grubości 200  $\mu\text{m}$  i wszystkie wyniki prób były negatywne ze względu na odporność na zwirowanie.

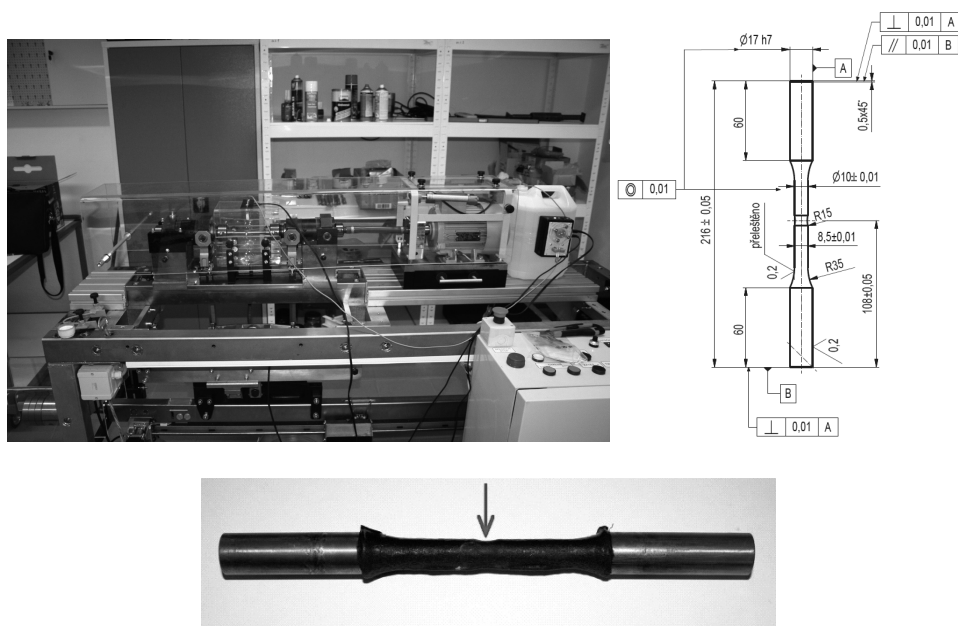


Rys. 7. Segmenty osi po badaniach odporności na zwirowanie: lewy z nałożonym grubowarstwowym systemem powłokowym o grubości 4,5 mm, prawy tradycyjny system powłokowy o grubości 200  $\mu\text{m}$

Fig. 7. The segments after tests of gritting – in left is strong 4,5 mm thick of painting system and in right is standard 200  $\mu\text{m}$  thick of painting system

### 3.3.3. Próba odporności systemu powłokowego na cykliczne mechaniczne obciążenia

Przeprowadzenie wymienionej próby weryfikuje elastyczność i trwałość systemu powłokowego na obciążenia eksploatacyjne osi zestawu kołowego. Badania przeprowadza się na maszynie zmęczeniowej umożliwiającej realizację obciążenie próbki za pomocą zginania obrotowego, co odwzorowuje obciążenie eksploatacyjne osi zestawu kołowego. Badaną próbkę o średnicy 8,5 mm wycinamy z osi jakości EA1N i nanosimy na nią badaną powłokę. Wymagany cykl badań obejmuje 4 sztuki próbek. Obciążenie badanej próbki rozpoczynamy od poziomu 170 Mpa i na każdym poziomie obciążenia badana powłoka musi wytrzymać obciążenie 13 milionów cykli. W czasie przeprowadzania próby spada na testowaną powłokę zdemineralizowana woda z częstotliwością 1 kropli na 15 sekund. Po zakończeniu badania na jednym poziomie testowana próbka musi pozostawać bez obciążenia na 96 godzin, a potem rozpoczyna się następny cykl badań, przy czym poziom obciążenia zwiększamy o 10 MPa. Próby zmęczeniowe są bardzo czasochłonne, ponieważ testowana powłoka klasy 1 musi wytrzymać obciążenie na trzech z czterech testowanych próbek, na co najmniej 10 poziomach obciążeń. W przypadku 2 i 3 klasy ochrony powłoka musi wytrzymać co najmniej trzy z czterech testowanych próbek na co najmniej 5 poziomach obciążenia. Podczas przeprowadzania badań zmęczeniowych powstają w badanej powłoce cykliczne obciążenia rozciągania i ściskania. Jeżeli w wyniku działania tych obciążeń dojdzie do popękania badanej powłoki, zdemineralizowana woda dostanie się na powierzchnię testowanej próbki i spowoduje korozję warstwy wierzchniej próbki, co może wpłynąć na przedwczesne złamanie. Żeby zapewnić możliwość rozwinięcia się korozji powierzchniowej próbki, konieczne jest utrzymywać przerwę 96 godzin pomiędzy poszczególnymi poziomami obciążenia. Na rysunku 8 przedstawiono widok maszyny zmęczeniowej oraz badanej próbki z naniesioną grubowarstwową powłoką.

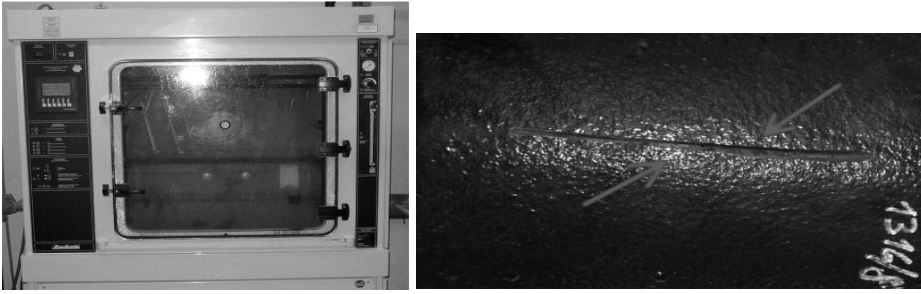


Rys. 8. Urządzenie testowe przeznaczone na próbę odporności systemu powłokowego na cykliczne mechaniczne obciążenie, zdjęcie i rysunek badanej próbki

Fig. 8. Tested Equipment used for test of painting system under cyclic mechanical stress, drawing and photo of tested specimen

### 3.3.4. Próba odporności powłoki na mgłę solną

Przeprowadzenie badań odporności powłoki na mgłę solną pozwala na weryfikację odporności badanej powłoki na narażenia korozyjne. Powłoki ochronne na zestawach kołowych podczas długoletniego użytkowania i okresowego serwisowania są narażone na działanie różnych środków chemicznych. Przyspieszone próby odporności badanej powłoki na narażenia korozyjne przeprowadza się, aby w stosunkowo krótkim czasie przedstawić wyniki badań. Próbę przeprowadza się w następujący sposób: próbkę z naniesioną powłoką nacina się przez całą grubość powłoki do warstwy wierzchniej metalowej próbki. Tak przygotowaną próbkę wkłada się do specjalnej komory testowej, gdzie poddana jest działaniu łaźni solnej. Po upływie określonego czasu próbkę wyjmuje się i ocenia poziom korozji w miejscu nacięcia. Na rysunku 9 przedstawiono widok komory badawczej oraz próbki po zakończeniu badań odporności powłoki na mgłę solną.



Rys. 9. Widok na komorę badawczą oraz próbkę po zakończeniu testów w mgłę solnej

Fig. 9. A view on salt-spray box and tested segment after finish this type of test

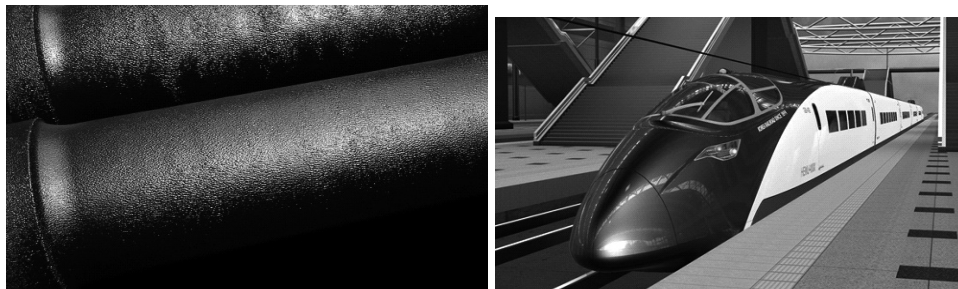
### 3.3.5. Próba odporności powłoki na szczególne narażenia korozyjne

Przeprowadzenie próby ma na celu stwierdzenie odporności badanej powłoki na wybrane narażenia korozyjne, takie jak:

- 3-procentowy roztwór kwasu siarkowego w zdemineralizowanej wodzie,
- 10-procentowy roztwór wodny chlorku potasu w zdemineralizowanej wodzie
- 10-procentowy roztwór wodny wodorotlenku potasu. w zdemineralizowanej wodzie.

Realizacja próby przebiega podobnie jak badanie odporności systemu powłokowego na mgłę solną. Badana próbka z naniesionym systemem powłokowym zanurza się w wybranym roztworze z substancją korodującą o temp. 23°C na 4 godziny, następnie przez 4 godziny próbka wyjęta z roztworu przebywa na powietrzu. Całkowite badania składają się z 32 cykli zanurzenia i sezonowania na powietrzu. Wyniki badań zmiany systemu powłokowego ocenia się wzrokowo oraz zmiany przyczepności wg normy ISO 2419.

W zakładach BONATRANS GROUP a.s. dla systemów powłokowych klasy pierwszej wykonuje się wszystkie próby potwierdzające jakość naniesionej powłoki przewidziane w normie EN 13261. Obecnie stosowany system powłokowy klasy 1 to tworzywo na bazie poliuretanu weco-PUR-2K-DS, z wysoką zawartością masy suchej, grubość nakładanej powłoki wynosi 4,5 mm. Wymieniony system powłokowy jest stosowany do zabezpieczenia osi zestawów kołowych dla projektu HEMU 440, gdzie prędkość użytkowa pociągu wynosi 440 km/h. Oś z naniesionym grubowarstwowym systemem powłokowym przedstawiono na rys. 10.



Rys. 10. Oś z nałożonym grubowarstwowym systemem powłokowym o grubości 4,5 mm przeznaczona dla pociągu Hemu, którego szybkość maksymalna wynosi 440 km/godz.

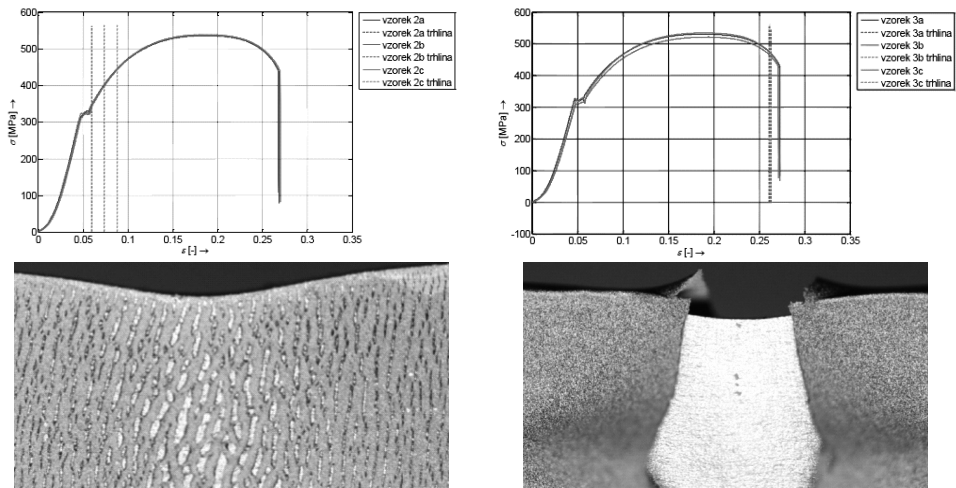
Fig. 10. Railway axles equipped strong 4,5 mm thick painting system used for hi-speed trains Hemu with maximal operational speed 440 km/hour

### 3.4. Specjalne próby systemów powłokowych

W przedsiębiorstwie BONATRANS GROUP a.s opracowano próby szybkiej oceny jakości badanego systemu powłokowego nieokreślone w normie EN 13261. W praktyce produkcyjnej często spotykamy się z koniecznością szybkiej oceny jakości różnych systemów powłokowych, głównie wytrzymałości i elastyczności zastosowanej powłoki. Do realizacji szybkiej oceny jakości badanej powłoki wykorzystano klasyczną próbę rozciągania. Do badania użyto typową próbkę wykonaną z materiału jakości EA1N z naniesionym systemem powłokowym. Próbę rozciągania realizowano z prędkością 10 mm/min. Na rozciąganą próbkę naniesiono pistoletem airbrush drobne kropelki farby dla uwidocznienia analizy odkształceń w miejscu rozpoczęcia naruszenia powłoki. W celu zdefiniowania właściwego odkształcenia badanej powłoki wykorzystano cyfrowo obrazową korelację (DIC). Taka bezkontaktowa ocena powierzchni odkształcanej umożliwia zdefiniowanie tensora odkształceń badanego materiału. Na rysunku 11 przedstawiono wyniki badań testowanej powłoki. Największe wartości odkształceń są porównywane przed momentem przzerwania się badanej powłoki, dla poszczególnych rodzajów powłok, jak również dla porównania wyników pomiędzy poszczególnymi seriami danej farby.

Na rysunku 11 widoczne są różnice w jakości dwóch porównywanych systemach powłokowych. Na lewym rysunku przedstawiono system powłokowy, w którym utworzyły się pęknięcia już na początku obciążania od razu po przekroczeniu granicy poślizgu stali. Na prawym rysunku przedstawiono system powłokowy, gdzie badana powłoka wytrzymała odkształcenie próbki i przerwała się tuż przed samym pęknięciem próbki. Ten system powłokowy wykazuje dużą wytrzymałość i wystarczającą elastyczność.





Rys. 11. Wyniki badań z próby rozciągania, gdzie naderwał się system powłokowy

Fig. 11. A record of tensile test with marking a area where the painting system was ruptured

### 3.5. Systemy powłokowe przeznaczone dla nanoszenia na koła kolejowe

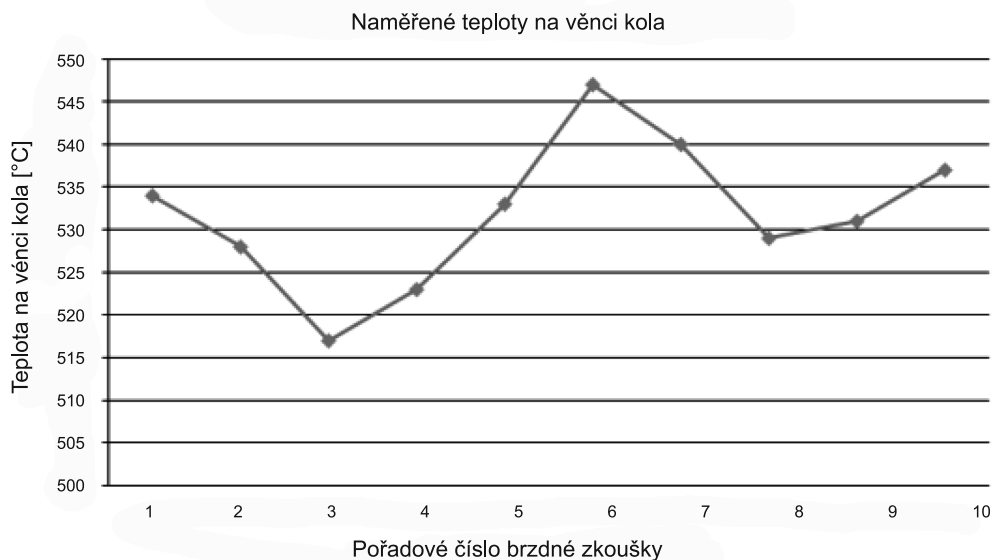
System powłokowy nanoszony na osie zestawów kołowych stanowi przede wszystkim funkcję ochronną. W kołach kolejowych system powłokowy powinien spełniać także funkcję diagnostyczną. W czasie eksploatacji przy niesprawnym układzie hamulcowym dochodzi czasem do ciągnięcia zahamowanego wagonu po torach, co w następstwie powoduje przegrzanie wieńca koła kolejowego. Obecnie są rozwijane systemy powłokowe, które same w czasie eksploatacji pełnią funkcję diagnostyczną, sygnalizując poprzez zmianę koloru, lub tworzenie się pęcherzyków na powierzchni przegrzanie koła i potrzebę przeprowadzenia kontroli zestawu kołowego. Te parametry spełniają czeski system powłokowy Telkyd S 210. Na rysunku 12 przedstawiono rozkład temperatury na wieńcu koła podczas próby hamowania.

Ten system powłokowy został naniesiony na koło, które poddano próbie hamowania z następującymi parametrami:

- wykorzystane szczęki hamulcowe: BECORIT 929-1 SG, 320×80 mm,
- moc hamowania: 50 kW,
- czas hamowania: 45 min,
- stała szybkość w czasie hamowania: 60 km/h.

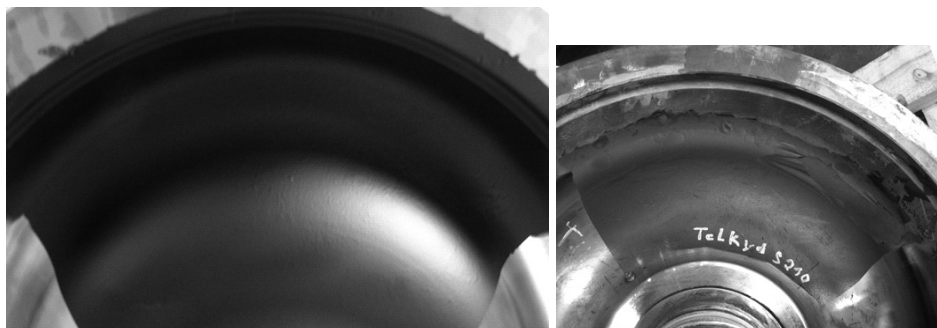
Na rysunku 12 przedstawiono rozkład temperatury na wieńcu koła zmierzony za pomocą termoelementu umieszczonego 9 mm pod stycznym okręgiem na wieńcu koła podczas procesu hamowania. Najwyższą temperaturę na wieńcu koła osiągnęła wartość 547°C. Na rysunku 13 zamieszczono system powłokowy Telkyd S210 naniesiony na tarczę koła przed i po ukończeniu próby hamowania.

Na rysunku 13 pokazano widok koła z naniesioną warstwą systemu powłokowego oraz wygląd koła po zakończeniu próby hamowania.



Rys. 12. Rozklad teploty na věncu kola podczas próby hamowania

Fig. 12. Temperature behaviour on wheel rim during brake test



Rys. 13. Naniesiony system powłokowy na tarczę koła przed próbą hamowania i po ukończeniu próby hamowania

Fig. 13. Tested painting system (Telkyd S210) applied on wheel web before and after finish brake test

#### 4. Wnioski

Wartość użytkowa warstwy powierzchniowej jest jednym z najważniejszych czynników decydujących o zdolności do spełniania wymogów eksploatacyjnych produktu [5]. Prawidłowo dobrana i wykonana warstwa powierzchniowa umożliwi uzyskanie następujących korzyści:

- zwiększenie niezawodności pracy części maszyn i zmniejszenie ich awaryjności,
- zwiększenie trwałości elementów maszyn przez zmniejszenie oporów tarcia oraz zwiększenie odporności na zużycie ścierne,



- zastąpienia z porównywalnym skutkiem drogich materiałów tańszymi o gorszych właściwościach użytkowych i nadawanie ich powierzchni fizycznej lepszych właściwości eksploatacyjnych,
- zmniejszenie strat energii na pokonywanie oporów tarcia w wyniku zmniejszenia się mas poruszających się części i na skutek poprawy własności trybologicznych powierzchni trących,
- zmniejszenie strat w gospodarce narodowej spowodowanych korozją stopów żelaza,
- zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego w wyniku zastąpienia energochłonnych technologii wytwarzania technologiami energooszczędnymi przyjaznymi ekologicznie.

Odpowiednio dobrane do warunków eksploatacji części maszyn technologiczne warstwy powierzchniowe pozwalają na znaczne przedłużenie ich trwałości eksploatacyjnej, zwłaszcza jeżeli chodzi o trwałość trybologiczną, co bezpośrednio wpływa na wzrost jakości użytkowej elementów maszyn. Przedstawione w niniejszej publikacji metody oceny jakości powłok ochronnych stosowanych na elementy zestawów kołowych mają istotny wpływ na osiągnięcie wymaganych standardów jakości zestawów kołowych. Ma to bezpośredni wpływ na wzrost bezpieczeństwa w czasie ich eksploatacji. Przedstawione metody oceny jakości powłok ochronnych mają charakter uniwersalny i mogą być stosowane poza techniką kolejową w budowie maszyn.

#### Literatura

- [1] Burakowski T., Wierchoń T., *Inżynieria powierzchni metali*, WNT, Warszawa 1995.
- [2] PN-73/M – *Warstwa wierzchnia. Nazwy i określenia*.
- [3] Kaczmarek J., Hanzel-Powierża Z., *Aktualny stan i perspektywy diagnostyki technologicznej warstwy wierzchniej*, IMJON, 79, Warszawa.
- [4] Kula P., *Inżynieria warstwy wierzchniej*, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2000.
- [5] Młynarczyk A., Jakubowski J., *Obróbka powierzchniowa i powłoki ochronne*, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
- [6] Hebda M., Wachal A., *Trybologia*, WNT, Warszawa 1980.
- [7] Gumbrowski M., Poschmann M., Bowi M., Bardehle T., *Der Eisenban Ingenieur*, 9/2002, TETZLAFF VERLAG GMBH HAMBURG.
- [8] Beretta S., Carboni M., Loconte A., *Impact of corrosion upon fatigue properties of steel*, 15 IWC, Prague 2007.
- [9] Nowosad M., Fajkos R., *Prüfungen der Schutzbeschichtungen der Radsatzwellen*, Road 2006.