

Karol BOGUCKI

Military Aviation Works No. 4 JSC (Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 4 S.A.)

CORROSION TESTING OF KINEMATIC CONNECTION DETAILS FROM THE JET ENGINE IN A SEAWATER ENVIRONMENT

Badania korozyjne elementów połączenia kinematycznego z silnika odrzutowego w środowisku wody morskiej

Abstract: *Corrosion is a worldwide problem, posing a threat to the safe operation of machinery and equipment. In this article has been analyzed the problem of corrosion on selected elements of the aircraft engine. At the beginning, are discussed the types of corrosion, as well as the materials from which were made the examined parts. The sensitive kinematic vapor from the jet engine was examined in three different galvanic coatings and in the state without any anti-corrosion coating in order to check the effectiveness of galvanic coatings. The results of the NSS tests were then illustrated and discussed. On the basis of the obtained test results, were formulated final conclusions.*

Keywords: test, transport, coating, phosphorus, steel

Streszczenie: *Korozja jest problemem ogólnoswiatowym, stwarzającym zagrożenie bezpiecznej eksploatacji maszyn i urządzeń. W niniejszym artykule problem korozji przeanalizowano na wybranych elementach silnika lotniczego. Na początku omówiono rodzaje korozji, a także materiały, z których zostały wykonane badane detale. Zbadana została newralgiczna para kinematyczna z silnika odrzutowego w trzech różnych powłokach galwanicznych oraz w stanie bez żadnego powłoki antykorozyjnego w celu sprawdzenia skuteczności powłok galwanicznych. Następnie zobrazowano i omówiono wyniki badań metodą NSS. Na podstawie uzyskanych wyników badań sformułowano wnioski końcowe.*

Słowa kluczowe: badanie, transport, powłoki, fosfor, stal

1. Introduction

Corrosion is one of the most common phenomenon in nature, which effects have a negative impact on the optimal functioning of the whole mechanism and, in extreme circumstance, lead to complete damage to the machine and death of the machine user.

To prevent corrosion are used various types of coatings (usually galvanic), which increase the resistance of the details. The type of corrosion protection layer depends on the material of the machine parts in question, as well as the working conditions. To check the effectiveness of galvanic coatings against corrosion. Two sensitive parts of the kinematic steam have been galvanized, which have applied different anti-corrosion coatings, which have been exposed to the same corrosive environment.

The purpose of this study is to determine which galvanic coating best protects the elements of the kinematic pair coming from the jet engine, which patrols the seaside airspace.

2. Theory

According to the dictionary of the American Society for Testing and Materials [2], corrosion is defined as "the chemical or electrochemical reaction between a material, usually metal, and its environment that causes degradation of the material and its properties" [2]. For most materials this means the formation of oxides or sulphides. The most common cause of corrosion is the interaction of water molecules, which contains dissolved salts and gases of various kinds. In contact with other substances, water acts as an electrolyte in which chemicals dissociate into ions and participate in a chemical reaction. The resulting metal ions usually merge with oxygen, and the resulting oxides usually have much weaker strength properties than their native material, which causes a deterioration in the condition of the workpiece during operation and can lead to serious failure of the entire working team [17].

Almost every human-made structure involves the use of non-precious metals, which are susceptible to corrosion. It is valued that the global cost of damage caused by corrosion is more than a thousand dollars per person per year. For example, the sudden collapse of the Silver Bridge over the Ohio River at Point Pleasant In Ohio from 1967 killed 46 people and it cost millions of dollars to rebuild the bridge again. The cause of the bridge failure was corrosive fatigue. Therefore, proper corrosion protection can save about 15-55% of the costs of this damage and even prevent the occurrence of serious accidents due to corrosion. It is safe to say that understanding the process of corrosion and protection against it is motivated by safety and financial aspects [11].

The classification of types of corrosion is based on identification with the naked eye as well as through morphology. The following forms of corrosion can be identified from the appearance of the corroded metal [2]:

- General corrosion
- Galvanic corrosion
- Pitting corrosion
- Crevice corrosion
- Intergranular corrosion
- Corrosion Fatigue

The general corrosion often occurs as a result of atmospheric exposure (polluted industrial environment) or in fresh and salt water, which results in oxidation of metals. It can also be observed during chemical, electrochemical polishing and passivation, where the anode and cathode sites are physically inseparable [5]. It can be prevented by appropriate selection of materials or by cathodic protection [15].

The galvanic corrosion occurs when two metals with different electrochemical potential meet in the same solution [5]. The difference of potentials causes the flow of electrons between these metals. Less resistant metal to corrosion becomes an anode and more resistant - a cathode. The greater the disproportion between the surface of the anode and the cathode, the faster the corrosion occurs, which takes place in leaded or lead-free solders in copper pipes supplying drinking water [15].

The crevice corrosion usually occurs in cracks and sheltered areas on metal surfaces in contact with corrosive substances. The oxygen in the crevice is consumed and converted to a hydroxyl ion. The metal corrodes and the excess positive charge is balanced by the migration of the chloride anion from the mass to the crevice [15]. Metals such as aluminum and stainless steel are particularly susceptible to this type of corrosion in seawater environments, which contain chloride ions [17].

The pitting is a form of corrosion, where small areas corrode preferentially leading to cavities or pits, and most of the surface remains intact. It causes failure through penetration with only a small percentage loss of weight of the whole structure. The most favorable environment for this corrosion is the marine environment. Ions such as Cl^- , Br^- and I^- , tend to cause pitting of steel and aluminum in significant concentrations, which are most susceptible to pitting [1].

The intergranular corrosion occurs along the grain boundaries of the metal. The grain boundary material acts as an anode and the larger grain area as a cathode. Energy flows from the small surface area of the anode, which is more active chemically, to the large surface area of the cathode, causing a corrosive reaction that penetrates deep into the metal. It is formed very often on elements made of stainless steel, nickel, brass and aluminium based alloys [17].

The corrosive fatigue is a process that leads to metal cracking under stress at values below tensile strength. Cracking occurs earlier due to cyclic loading and corrosion at lower stress levels. Corrosive fatigue is difficult to prediction, there is no specific environment that affects a particular alloy or alloying system [18].

3. Analyze problems

The two-engine jet airplanes made by Russia are commonplace in the airspace of the Baltic Sea. Operation of engines in such an environment containing salt spray increases the

risk of corrosion. The running engine sucks air through the airplane inlet diffuser to the low pressure compressor, then the internal flow through the high pressure compressor is transported to the combustion chamber and continues to flow to the high pressure turbine and fan turbine. The transport of air with brine particles takes place through pipes, which also supply air to the units. In the engine supports, the air is mixed with oil and in the oil unit, the air and oil are separated, but the brine particles remain in the oil. The oil is then transported to the oil tank and from there through the pipes to each of the operating oil units, supplying the brine particles that remain in the units as well as in the drive box, reacting with details to create corrosion.

Various anti-corrosion coatings are used throughout the world (e.g. zinc plating, copper plating, oxidation or silver plating), but due to the very complex procedural process of changing Russian repair documents, only oxidised and oxidophosphate coatings have been used to protect kinematic pair components consistently for almost forty years (according to the source documentation).

4. Test object

The object of the study is the kinematic pair formed by: steel gear wheel (material: 12H2NWFA-WD, composition - see tab. 1 [6]) and steel torsion shaft (material: 18H2N4WA, composition - see tab. 2 [7]). During renovation, the anti-corrosion coating is reconstituted on the tested elements [3].

Table 1

Share of alloying additives in steel 12H2NWFA-WD [6]

C	Cr	W	Ni	Mn	Si
0.9÷1.6	1.9÷2.4	0.9÷1.6	0.8÷1.2	0.3÷0.7	0.17÷0.37
Cu	P	S	Mo	Ti	V
< 0.025	< 0.025	< 0.025	< 0.15	< 0.03	0.18÷0.28

Steel 12H2NWFA-WD belongs to the third group of high-alloy steels with hardened martensite core with low carbon content. Chromium lowers the temperature of the beginning of martensitic transformation and increases the content of austenite residues. It increases significantly the hardenability but at the same time reduces ductility and impact resistance. Nickel provides good mechanical properties and increases strength at elevated temperatures. Wolfram reduces sensitivity to overheating. It prevents the formation of coarse cement mesh, but increases the brittleness of the surface layer and negatively affects thermal conductivity. Vanadium inhibits the growth of austenite grain at high quenching temperatures and slightly increases the concentration of carbon in the cement substrate. However, the low content of alloying additives, especially chromium, makes the steel very vulnerable to corrosion [8].

Table 2

Share of alloying additives in steel 18H2N4WA [7]

C	Cr	W	Ni	Mn	Si
0.14÷0.20	1.35÷1.65	0.8÷1.2	4.0÷4.4	0.25÷0.55	0.17÷0.37
Cu	P	S	Mo	Ti	V
< 0.3	< 0.025	< 0.025	< 0.15	< 0.06	< 0.05

Steel 18H2N4WA belongs to the class of high quality alloyed structural steels with a strongly hardened core. It is characterized by high resistance to abrasion and rigidity combined with high resistance to dynamic loads and vibrating. The properties of this steel are very similar to the steel 12H2NWFA-WD. They have similar plastic and strength properties, but at the same time have low corrosion resistance [9].

5. Galvanic coatings

As part of the renovation of details from jet engines, they are subjected to, among others, galvanic processing. The aim of this method is to apply a special coating by chemical method, which protects the detail from corrosion. In the case of overhauls of gear wheels and torsion shafts from aircraft engines, the most popular electroplating treatments are: oxidation, oxidophosphating and phosphating.

The oxidation process is based on creating a protective magnetite coating (Fe_3O_4) on the steel surface. Before the surface is ready for oxidation, it must be cleaned of any trace corrosion and degreased. This can be done with organic solvents or alkaline solutions and etching in sulphuric or hydrochloric acid with added inhibitors. The actual oxidation process takes place in the form of a chemical bath in a concentrated NaOH solution with the addition of sodium nitrates (III) and (V). The process time and temperature of the solution are selected depending on the carbon content of the steel. The higher the carbon content, the higher the temperature of the solution and the duration of the oxidation process [14]. The oxidized coating can be recognized by its black color with a dark blue tint. It is particularly suitable for corrosion protection of parts working in oil [4].

Phosphating is particularly suitable as an anti-corrosion coating for small diameter pipes made of steel and is also a very good primer for anti-corrosion lacquers [12, 14]. It takes place in a bath usually containing sodium or ammonium hydrogen phosphates, phosphoric acid, as well as oxidizing additives and accelerators, such as sodium carbonate (IV) or zinc nitrate (V). Such baths have an acid reaction of $\text{pH} = 4\div 6$. As a result of their action, the surface of the workpiece is degreased and at the same time thin amorphous coatings are formed on it, composed of phosphates and iron oxides. Therefore, this type of galvanic treatment is effective in relatively small details with a volume of 0.5 m^3 to several m^3 [14].

The oxidophosphating process is a special kind of phosphating treatment, which consists of oxidizing compounds containing phosphorus and zinc. Therefore it can be called

zinc phosphating treatment [14]. At the beginning of the process, the parts must be degreased with a mixture of hydrochloric acid and urotropine. Appropriate oxidophosphating is carried out in a solution consisting of zinc and barium nitrates (V) as well as dihydrogen zinc phosphate $Zn(H_2PO_4)_2$ in temperature $75\pm 3^\circ C$. After oxidizing, the details must be treated in the bath with potassium perchromate, which, as an oxidant, generates the final form of corrosion protection. In order to increase the resistance of the oxidophosphate coating to water molecules at the very end of the coating, it is still hydrophobized, which gives the details repulsive properties of water molecules and finally gives them a dense, fine-crystalline structure in grey [16].

6. Test method

Salt mist, this is the most commonly used corrosive environment in laboratory corrosion tests. The testing methodology is based on ISO 9227. In Poland, the current version is PN-EN ISO 9227:2017-06, which establishes the apparatus, reagents and procedure for tests carried out in brine under the NSS method, in brine with acetic acid in the AASS method and in brine with acetic acid and with the addition of chloride copper (II) as an accelerator in the CASS method [13]. The list of parameters for each method is presented in tab. 3 [10].

Table 3

Parameters for seawater environment corrosion testing methods [10]

Nazwa metody	NSS	AASS	CASS
Temperature	$35^\circ C \pm 2^\circ C$	$35^\circ C \pm 2^\circ C$	$50^\circ C \pm 2^\circ C$
pH (collected solution)	6.5÷7.2	3.1÷3.3	3.1÷3.3
Average collection rate for a horizontal collecting area of 80 cm ²	1.5 mL/h ± 0.5 mL/h		
Concentration of sodium chloride (collected sodium)	50 g/l ± 5 g/l		
Arrangement of the test specimens	at an angle $15^\circ \div 25^\circ$ from the vertical		
Time	selected 240h		

The aim of the tests is to estimate the corrosion resistance of metal materials with or without permanent or temporary corrosion protection. Taking into account conditions similar to those of the Baltic Sea, corrosion tests were performed according to the Neutral Salt Spray Test (NSS)

7. Test results

To corrosion testing by NSS method were subjected Four sets of gear wheels and torsion shafts (see fig. 1). Each set has undergone a different galvanic treatment (without galvanic coating, oxidation, phosphatizing and oxidophosphating & hydrophobization). It is worth that phosphate coating is not used for corrosion protection for the above kinematic pair according to Russian repair documentation.

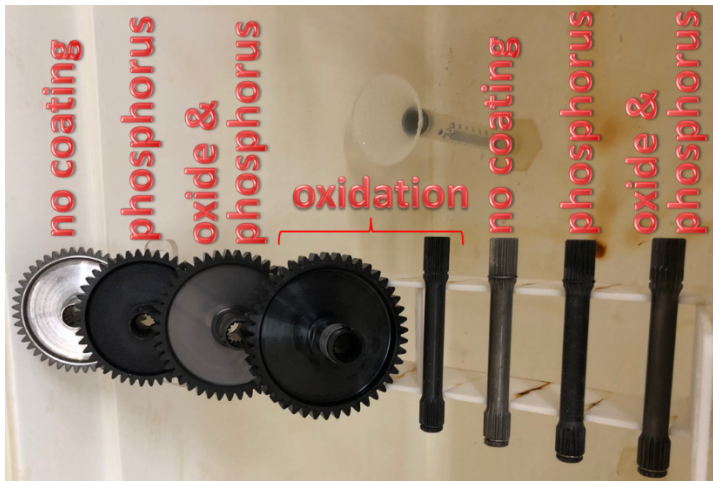


Fig. 1. Gear wheels and torsion shafts before starting the NSS test

The total time of the test that was accepted is 240 hours. This is the closest value to the jet engine interval of 350 hours. Verification of the condition of the examined details took place four times in similar periods (after 70; 120; 165 and 240 hours). Before the start of the test, all the parts were degreased in the ultrasonic bath and then washed with acetone. The PH in the salt chamber before the test was 6.61 and together with the time of the test it systematically increased to the maximum value of 6.91 after 240 hours of the test; and the temperature in the salt chamber was 35.1°C; while the salinity in the salt chamber remained at 5.1%.

At the first inspection of the condition of the tested parts after 70 hours of NSS testing, traces of corrosion were observed on all tested wheels and rollers. The most advanced level of corrosion was found on parts without any galvanic coating, which almost completely corroded after only 120 hours. (see fig. 2).



Fig. 2. The gear wheel and a torsion shaft without any galvanic coatings after 120 h NSS testing

The next most corroded galvanic coating was oxidized one. The development of corrosion on this coating was specific in that the increase in corrosion was almost imperceptible after 120 and 165 hours of testing compared to the state after 70 hours. Only a significant increase in corrosion occurs at the end of the test (see fig. 3).



Fig. 3. Oxidized gear wheel and torsion shaft after 165 hours (left side) and after 240 hours (right) NSS test.

The development of corrosion on the parts tested is the best visible on a gear wheel that has been oxide-phosphate treated (see fig. 4). It is easy to observe how the corrosion develops from a small amount after 70 hours, through systematic build-up after 120 and 165 hours of testing to almost complete corrosion of the gear wheel after 240 hours of testing. This coating protects against corrosion much better than a coating oxidized in the first phase of the test (up to 70 test hours). Over the course of the test, the resistance of the oxidized coating begins to decrease, while the oxidized coating retains almost the same condition during the middle phase of the test. Corrosion develops very similarly for oxidized and oxidized coverings after 165 hours until complete corrosion of the details after 240 hours of NSS testing.



Fig. 4. The gear wheel with oxidophosphate coating after 70 h (4.1); 120 h (4.2); 165 h (4.3) and 240 h (4.4) NSS test

Galvanic coating, which showed the highest resistance to corrosion In a sea fog environment, the NSS test is a phosphate coating (see fig. 5). During almost the entire test period, the slowest corrosion growth was observed for gear wheels and torsional shafts in this coating. More visible signs of corrosion could only be observed after 165 hours of testing, and at the end of the NSS test, when after 240 hours the details corroded almost completely, except for the teeth on the gear wheel.



Fig. 5. The gear wheel and torsion shaft with phosphate coating after 120 h (5.1) and after 240 h (5.2) NSS test

8. Summary and conclusions

- All components tested by the NSS method corroded during the test, which means that none of the galvanic coatings tested provide full protection against corrosion in a seawater environment and salt fog environment, which containing chlorides.
- The best protection against corrosion was provided by phosphate coating. It was the only one galvanic coating on which no complete corrosion was found of the teeth on the gear wheel, because they were subjected to a carburizing process during production.
- Components without any galvanic coating were completely corroded after 120 hours of NSS testing, while parts with an oxidized coating and oxidophosphate corroded almost completely after 240 hours of examination. In each case, including the phosphate coating, the fastest corrosion growth was observed after 165 hours of NSS testing.

9. References

1. Ahmad Z.: Principles of corrosion engineering and corrosion control. IChem^E, Burlington, MA, 2006, USA.
2. Al-Numan B., Cicek V.: Corrosion chemistry. John Wiley & Sons Ltd, 2011.
3. Bogucki K.: Magnetic tests of SNA - HP-59A kinematic connection details in the RD-33 engine. Journal of KONBiN, Vol. 50, Iss. 2, 2020, DOI 10.2478/jok-2020-0035.
4. CASTI Publishing Inc., Practical self-study guide to corrosion control. Edmonton 1998, Alberta, Canada.
5. Elboudjaini M., Ghali E., Sastri V.S.. Corrosion Prevention and Protection Practical Solutions”, John Wiley & Sons Ltd, 2007, Canada.
6. GOST 11268-76, Prokat tonkolistovoj specialnogo naznachenija iz konstrukcionnoj legirovannoj vysokokacestvennoj stali. Techničeskije uslovija.
7. GOST 4543-71, Prokat iz legirovannoj konstrukcionnoj stali. Techničeskije uslovija.
8. <http://www.profprokat.ru> - stal 12H2NWFA (EI712).
9. <http://www.totalmetall.com> - stal 18H2N4WA.
10. <https://www.micomlab.com/micom-testing/> - ISO 9227.
11. Jacobson G.: Impact, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. NACE International, 2016.
12. Liberti G.: Amorphous phosphating as a base for painting. Product Finishing, 1993.
13. PN-EN ISO 9227:2017-06 - Badania korozyjne w sztucznych atmosferach - Badania w rozpylonej solance.
14. Poradnik galwanotechnika. Wydanie trzecie zmienione, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

15. Sastri V.S.: Green corrosion inhibitors. John Wiley & Sons inc., Canada 2011.
16. Schlesinger M., Paunovic M.: Modern Electroplating. 5th edition, John Wiley & Sons inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2014.
17. Schweitzer P.A.: Fundamentals of corrosion, Mechanisms, Causes, and Preventative Methods. CRC Press, Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, USA, 2010.
18. Schweitzer P.A.: Fundamentals of metallic corrosion, atmospheric and media corrosion of metals. CRC Press, Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, USA, 2007.

BADANIA KOROZYJNE ELEMENTÓW POŁĄCZENIA KINEMATYCZNEGO Z SILNIKA ODRZUTOWEGO W ŚRODOWISKU WODY MORSKIEJ

1. Wprowadzenie

Korozja jest jednym z powszechnych zjawisk w przyrodzie, którego skutki mają negatywny wpływ na optymalną pracę całego mechanizmu, a w skrajnym przypadku prowadzą do całkowitego uszkodzenia maszyny i śmierci użytkownika tej maszyny.

Aby zapobiegać powstawaniu korozji, stosuje się różnego rodzaju pokrycia (zazwyczaj galwaniczne), które podnoszą odporność detali. Rodzaj warstwy antykorozyjnej zależy od materiału z którego wykonane są dane części maszyny, a także od warunków pracy. Aby sprawdzić skuteczność pokryć galwanicznych na korozję. Dwa newralgiczne detale pary kinematycznej zostały poddane obróbce galwanicznej, w ramach której zostały nałożone różne pokrycia antykorozyjne, które później wystawiono na działanie tego samego środowiska sprzyjającego powstawaniu korozji.

W przypadku pary kinematycznej z rosyjskiego silnika odrzutowego przewidziany jest remont części poprzez odtworzenie pokrycia oksydofosforanowego lub oksydowanego w różnych korelacjach między kołem i wałkiem w zależności od warunków pracy w zespole.

Powyższe badanie ma na celu określić, które pokrycie galwaniczne najlepiej zabezpiecza elementy pary kinematycznej pochodzących z rosyjskiego silnika odrzutowego, który patroluje nadmorską przestrzeń powietrzną.

2. Teoria

Według słownika Amerykańskiego Towarzystwa Badań i Materiałów [2], korozja jest definiowana jako "chemiczna lub elektrochemiczna reakcja pomiędzy materiałem, zwykle metalem, a jego otoczeniem, która powoduje pogorszenie jakości materiału i jego właściwości" [2]. Dla większości materiałów oznacza to tworzenie się tlenków lub siarczków. Najczęstszą przyczyną powstawania korozji jest oddziaływanie cząsteczek wody, która zawiera rozpuszczone różnego rodzaju sole i gazy. W kontakcie z innymi substancjami woda działa jako elektrolit, w którym związki chemiczne dysocjują w jony i uczestniczą w reakcji chemicznej. Powstałe jony metali zwykle łączą się z tlenem, a powstające tlenki mają zazwyczaj znacznie słabsze właściwości wytrzymałościowe niż

ich materiał rodzimy co pogarsza stan detalu podczas eksploatacji i może prowadzić do poważnej awarii całego pracującego zespołu [17].

Prawie każda struktura wytworzona przez człowieka obejmuje wykorzystanie metali nieszlachetnych, które są podatne na korozję. Szacuje się, że światowe koszty szkód spowodowanych korozją wynoszą ponad tysiąc dolarów na jednego człowieka rocznie. Na przykład, nagłe zawalenie się Srebrnego Mostu na rzece Ohio w Point Pleasant w stanie Ohio z 1967 roku zabiło 46 osób, a ponowne odbudowanie mostu kosztowało miliony dolarów. Przyczyną awarii mostu było zmęczenie korozyjne. Dlatego właściwa ochrona antykorozyjna może zaoszczędzić ok. 15-55% kosztów tych szkód, a nawet ochronić przed wystąpieniem poważnych wypadków wynikających z działania korozji. Można śmiało stwierdzić, że zrozumienie procesu korozji i ochrony przed nią jest umotywowane bezpieczeństwem i aspektem finansowym [11].

Klasyfikacja rodzajów korozji, opiera się na identyfikacji wizualnej. Na podstawie wyglądu skorodowanego metalu można zidentyfikować poniższe formy korozji [2]:

- jednolita
- wżerowa (Pitting)
- międzykrystaliczna
- galwaniczna
- szczelinowa
- zmęczenie korozyjne

Jednolita korozja często wynika z narażenia atmosferycznego (zanieczyszczone środowisko przemysłowe) lub w wodach słodkich i słonych, w wyniku których dochodzi do utleniania metali. Można ją również zaobserwować podczas chemicznego, elektrochemicznego polerowania i pasywacji, gdzie miejsca anodowe i katodowe są fizycznie nierozłączne [5]. Można jej zapobiec przez odpowiedni dobór materiałów lub przez ochronę katodową [15].

Korozja galwaniczna występuje, gdy dwa metale o różnym potencjale elektrochemicznym stykają się w tym samym roztworze [5]. Różnica potencjałów powoduje przepływ elektronów pomiędzy tymi metalami. Mniej odporny na korozję metal staje się anodą, a bardziej odporny - katodą. Im większa jest dysproporcja powierzchni anody i katody tym korozja szybciej powstaje, co ma miejsce w lutowiacznych i bezolowiowych w rurach miedzianych doprowadzających wodę pitną [15].

Korozja szczelinowa występuje zwykle w szczelinach i osłoniętych obszarach na powierzchniach metalowych w kontakcie z substancjami żrącymi. Tlen w szczelinie jest zużywany i przekształcany do jonu hydroksylogowego. Metal koroduje, a nadmiar ładunku dodatniego jest równoważony przez migrację anionu chlorkowego z masy do szczeliny [p]. Szczególnie podatne temu typowi korozji są metale takie jak aluminium i stal nierdzewna w środowiskach wody morskiej, która zawiera jony chlorkowe [17].

Pitting jest formą korozji, gdzie małe obszary korodują preferencyjnie prowadząc do powstawania ubytków lub wżerów, a większa część powierzchni pozostaje nienaruszona. Powoduje ona awarię przez penetrację przy niewielkiej tylko procentowej utracie wagi całej konstrukcji. Najbardziej sprzyjające środowisko dla tej korozji to środowisko morskie. Jony, takie jak Cl⁻, Br⁻ i I⁻, w znacznych stężeniach mają tendencję do powodowania wżerów stali i aluminium, które są najbardziej podatne na pitting [1].

Korozja międzykrystaliczna zachodzi wzdłuż granic ziaren metalu. Materiał graniczny ziarna działa jak anoda, a większa powierzchnia ziarna jak katoda. Zachodzi przepływ energii z małej powierzchni anody, która jest bardziej aktywna chemicznie, do dużej powierzchni katody, co powoduje reakcję korozyjną wnikającą głęboko w metal. Bardzo często powstaje na elementach wykonanych ze stali nierdzewnej, niklu, mosiądzu i stopów na bazie aluminium [17].

Zmęczenie korozyjne jest zjawiskiem, które prowadzi do pęknięcia metalu pod wpływem naprężeń przy wartościach poniżej wytrzymałości na rozciąganie. Pęknięcie występuje wcześniej z powodu cyklicznego obciążenia i korozji przy niższych poziomach naprężeń. Zmęczenie korozyjne jest trudne do przewidzenia, nie ma szczególnego środowiska, które ma wpływ na dany stop lub system stopów [18].

3. Analiza problemu

Dwusilnikowe samoloty odrzutowe produkcji rosyjskiej są często spotykane w przestrzeni powietrznej morza Bałtyckiego. Eksploatacja silników w takim środowisku zawierającym mgłę solną zwiększa zagrożenie korozyjne. Pracujący silnik zasysa powietrze przez samolotowy dyfuzor wlotowy do sprężarki niskiego ciśnienia, następnie opływem wewnętrznym przez sprężarkę wysokiego ciśnienia jest transportowane do komory spalania i dalej przepływa do turbiny wysokiego ciśnienia i do turbiny wentylatora. Transport powietrza z cząsteczkami solanki odbywa się przez przewody rurowe, które również doprowadzają powietrze do agregatów. W podporach silnika powietrze miesza się z olejem, a w agregacie olejowym następuje oddzielenie powietrza od oleju, ale cząsteczki solanki zostają w oleju. Dalej olej jest transportowany do zbiornika oleju, a z niego przewodami rurowymi do każdego z pracujących agregatów olejowych dostarczając przy tej okazji cząsteczki solanki, które pozostają w agregatach, jak i również w skrzynce napędów reagując z detalami tworząc korozję.

Na świecie stosuje się różne pokrycia antykorozyjne (np. cynkowanie, miedziowanie, oksydowanie czy srebrzenie), niemniej ze względu na bardzo złożony tok proceduralny wprowadzania zmian w rosyjskich dokumentacjach naprawczych, stosowane są tylko pokrycia oksydowane i oksydofosforanowe do ochrony elementów par kinematycznych niezmiennie od prawie czterdziestu lat (zgodnie z dokumentacją źródłową).

4. Obiekt badań

Obiektem badań jest para kinematyczna, którą tworzą: stalowe koło zębate (materiał: 12H2NWFA-WD, skład - patrz tab. 1 [6]) oraz stalowy wałek skrętny (materiał: 18H2N4WA, skład - patrz tab. 2 [7]). Podczas remontu na badanych elementach współpracujących ze sobą odtwarzane jest pokrycie antykorozyjne [3]

Tabela 1

Udział dodatków stopowych w stali 12H2NWFA-WD [6]

C	Cr	W	Ni	Mn	Si
0,9÷1,6	1,9÷2,4	0,9÷1,6	0,8÷1,2	0,3÷0,7	0,17÷0,37
Cu	P	S	Mo	Ti	V
< 0,025	< 0,025	< 0,025	< 0,15	< 0,03	0,18÷0,28

Stal 12H2NWFA-WD należy do trzeciej grupy wysokostopowych stali z hartowanym rdzeniem o strukturze martenzytowej z niską zawartością węgla. Chrom obniża temperaturę początku transformacji martenzytycznej i zwiększa zawartość pozostałości austenitu. Znacznie zwiększa hartowność ale jednocześnie zmniejsza plastyczność i udatność. Nikiel zapewnia dobre właściwości mechaniczne i zwiększa wytrzymałość w podwyższonych temperaturach. Wolfram zmniejsza wrażliwość na przegrzanie. Zapobiega powstawaniu gruboziarnistej siatki cementowej, ale podnosi kruchość warstwy wierzchniej i negatywnie wpływa na przewodnictwo cieplne. Wanad hamuje wzrost ziarna austenitu w wysokich temperaturach hartowania i nieznacznie zwiększa stężenie węgla w podłożu cementowym. Jednak niewielka zawartość dodatków stopowych, zwłaszcza chromu sprawia, że stal staje się bardzo podatna na działanie korozji [8].

Tabela 2

Udział dodatków stopowych w stali 18H2N4WA [7]

C	Cr	W	Ni	Mn	Si
0,14÷0,20	1,35÷1,65	0,8÷1,2	4,0÷4,4	0,25÷0,55	0,17÷0,37
Cu	P	S	Mo	Ti	V
< 0,3	< 0,025	< 0,025	< 0,15	< 0,06	< 0,05

Stal 18H2N4WA należy do klasy wysokiej jakości stopowych stali konstrukcyjnych z silnie utwardzonym rdzeniem. Charakteryzuje się wysoką odpornością na ścieranie i sztywnością w połączeniu z wysoką odpornością na obciążenia dynamiczne i wibracyjne. Właściwości tej stali są bardzo podobne do stali 12H2NWFA-WD. Mają podobne właściwości plastyczne i wytrzymałościowe, ale jednocześnie charakteryzują się niską opornością na działanie korozji [9].

5. Pokrycia galwaniczne

W ramach remontu detali pochodzących z silników odrzutowych, poddaje się je m.in. obróbce galwanicznej. Celem tej metody jest nałożenie metodą chemiczną specjalnego pokrycia, które chroni detal przed korozją. W przypadku remontu kół zębatych i wałków skrętnych pochodzących z silników lotniczych, najpopularniejszymi obróbkami galwanicznymi są oksydowanie, oksydofosforanowanie i fosforanowanie.

Proces oksydowania polega na utworzeniu na powierzchni stali powłoki ochronnej magnetytu (Fe_3O_4). Zanim powierzchnie będzie gotowa do oksydowania musi zostać

oczyszczona ze śladowej korozji i odtłuszczona. Można to wykonać za pomocą rozpuszczalników organicznych lub roztworów alkalicznych i trawienia w kwasie siarkowym lub solnym z dodatkiem inhibitorów. Właściwy proces oksydowania odbywa się w formie kąpeli chemicznej w stężonym roztworze NaOH z dodatkiem azotanów (III) i (V) sodu. Czas realizacji procesu i temperaturę roztworu dobiera się w zależności od zawartości węgla w stali. Im większa jest zawartość węgla tym wyższa jest temperatura roztworu i czas realizacji procesu oksydowania [14]. Pokrycie oksydowane można rozpoznać po czarnej barwie z granatowym odcieniem. Ma szczególne zastosowanie do ochrony przed korozją detali pracujących w oleju [4].

Fosforanowanie ma szczególne zastosowanie jako pokrycie antykorozyjne dla przewodów rurowych o małych średnicach wykonanych ze stali, jak i również stanowi bardzo dobry podkład dla lakierów antykorozyjnych [12, 14]. Proces fosforanowania odbywa się w kąpeli zawierającej zazwyczaj wodorofosforany sodu lub amonu, kwas fosforowy, a także dodatki utleniające i przyspieszacze, np. węglan (IV) sodu lub azotan (V) cynku. Tego typu kąpiele mają odczyn kwaśny o $\text{pH} = 4\div 6$. W wyniku ich działania powierzchnia detalu zostaje odtłuszczona i jednocześnie tworzą się na niej cienkie amorficzne powłoki, złożone z fosforanów i tlenków żelaza. Dlatego też ten rodzaj obróbki galwanicznej jest skuteczny w stosunkowo małych detalach o objętości od $0,5 \text{ m}^3$ do kilku m^3 [14].

Proces oksydofosforanowania jest to szczególny rodzaj obróbki fosforanowania, która składa się ze związków utleniających zawierających fosfor i cynk. Dlatego też nazywana może być obróbką Fosforanowania cynkowego [14]. Na początku procesu detale muszą zostać odtłuszczone mieszaniną kwasu solnego z urotropiną. Właściwe oksydofosforanowanie przeprowadza się w roztworze składającym się z azotanów (V) cynku i baru, a także diwodorofosforanu cynku $\text{Zn}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ w temp. $75\pm 3^\circ\text{C}$. Po oksydofosforowaniu, należy detale obrócić w kąpeli w nadchromianie potasu, który jako utleniacz generuje ostateczną postać pokrycia antykorozyjnego. Aby zwiększyć odporność pokrycia oksydofosforanowego na cząsteczki wody na sam koniec poddaje się jeszcze hydrofobizacji, dzięki której detale zyskują właściwości odpychające cząsteczki wody i nadają ostatecznie strukturę zwartą, drobnokrystaliczną w szarym kolorze [16].

6. Metoda badawcza

Mgła solna, jest to najczęściej stosowane środowisko korozyjne w laboratoryjnych badaniach korozyjnych. Metodyka badań w Polsce opiera się na normie PN-EN ISO 9227:2017-06, w której ustalono aparaturę, odczynniki i procedurę w badaniach prowadzonych w solance w ramach metody NSS, solance z dodatkiem kwasu octowego w metodzie AASS i w solance z kwasem octowym i z dodatkiem chlorku miedzi (II) w metodzie CASS [13]. Wykaz parametrów, patrz tab. 3 [10].

Tabela 3

Parametry dla metod badań korozyjnych w środowisku wody morskiej [10]

Nazwa metody	NSS	AASS	CASS
Temperatura	35°C ± 2°C	35°C ± 2°C	50°C ± 2°C
Skala pH	6,5÷7,2	3,1÷3,3	3,1÷3,3
Średni wskaźnik zbiórki dla poziomu horyzontalnego o pow. zbierania 80 cm ²	1,5 mL/h ± 0,5 mL/h		
Stężenie chlorku sodu (nagromadzenie soli)	50 g/l ± 5 g/l		
Położenie próbek do badań	pod kątem 15° ÷ 25° od pionu		
Czas próby	przyjęto 240 h		

Celem badań jest oszacowanie odporności na korozję materiałów metalowych ze stałą lub czasową ochroną antykorozyjną lub bez takiej ochrony. Uwzględniając warunki zbliżone do panujących nad morzem Bałtyckim, badania korozyjne wykonano wg metody NSS (Neutral Salt Spray Test).

7. Wyniki badań

Badaniu korozyjnemu metodą NSS, zostały poddane cztery komplety kół zębatych i wałków skrętnych (patrz rys. 1). Każdy komplet został poddany innej obróbce galwanicznej (bez żadnego pokrycia galwanicznego, oksydowaniu, fosforowaniu i oksydofosforowaniu wraz z hydrofobizacją). Warto tutaj zwrócić uwagę na fakt, że pokrycie fosforanowe nie jest stosowane do ochrony antykorozyjnej dla powyższej pary kinematycznej według rosyjskich dokumentacji naprawczych.



Rys. 1. Koła zębate i wałki skrętne przed rozpoczęciem badania korozyjnego metodą NSS

Łączny czas badania jaki został przyjęty to 240 h. Jest to najbliższa wartość względem wartości rezerwu międzyremontowego silnika odrzutowego wynosząca 350 h. Weryfikacja stanu badanych elementów konstrukcyjnych miała miejsce czterokrotnie w zbliżonych do siebie okresach (po 70; 120; 165 i 240 h). Przed rozpoczęciem badania, wszystkie części zostały odłuszczone w wannie ultradźwiękowej, a następnie przemyte acetonem. Przed rozpoczęciem badania, w komorze solnej zmierzono wartość 6,61 w skali pH i wraz z czasem przeprowadzenia badania, pH systematycznie rosło do maksymalnej wartości 6,91 po 240 h badania; a temperatura w komorze solnej wynosiła 35,1°C; natomiast zasolenie w komorze solnej utrzymywało się na wartości 5,1%.

Przy pierwszej kontroli stanu badanych detali po 70 h badania metodą NSS, zaobserwowano ślady korozji na wszystkich badanych kołach i wałkach. Najbardziej zaawansowany poziom korozji został stwierdzony na kole i wałku bez żadnego pokrycia galwanicznego, które niemal całkowicie skorodowały już po 120 h (patrz rys. 2).



Rys. 2. Koło zębate i wałek skrętny bez żadnego pokrycia galwanicznego po 120 h badania korozyjnego metodą NSS

Następnym najmocniej skorodowanym pokryciem galwanicznym było pokrycie oksydowane. Rozwój korozji na tym pokryciu był o tyle specyficzny, że przyrost korozji był niemal niezauważalny po 120 i 165 h badania w porównaniu ze stanem po 70 h. Dopiero znaczący przyrost korozji następuje pod koniec badania (patrz rys. 3).



Rys. 3. Oksydowane koło zębate i wałek skrętny po 165 h (z lewej strony) i po 240 h (z prawej strony) badania korozyjnego metodą NSS

Rozwój korozji na badanych detalach jest najlepiej widoczny na kole zębatego, które zostało poddane oksydofosforanowaniu (patrz rys. 4). Łatwo można zaobserwować, jak korozja rozwija się od niewielkiej ilości po 70 h przez systematyczny narost po 120 i 165 h

badaniach aż do niemal całkowitego skorodowania koła zębatego po 240 h badania. To pokrycie znacznie lepiej chroni przed korozją, niż pokrycie oksydowane w pierwszej fazie badania (do 70 h próby). Z czasem realizacji próby, odporność pokrycia oksydofosforanowego zaczyna słabnąć podczas gdy pokrycie oksydowane zachowuje niemal taki sam stan podczas środkowej fazy próby. Korozja rozwija się bardzo podobnie dla pokrycia oksydowanego i oksydofosforanowego po 165 h aż do całkowitego skorodowania detali po 240 h badania w solance.



Rys. 4. Koło zębate z pokryciem oksydofosforanowym po 70 h (4.1); 120 h (4.2); 165 h (4.3) i 240 h (4.4) badania korozyjnego metodą NSS

Pokryciem galwanicznym, które wykazało się największą odpornością na korozję w środowisku mgły morskiej podczas badania metodą NSS jest pokrycie fosforanowe (patrz rys. 5). Przez niemal cały okres badania zaobserwowano najwolniejszy przyrost korozji dla kół zębatych i wałków skrętnych w tym pokryciu. Bardziej widoczne ślady korozji można było zaobserwować dopiero po 165 h badania, a także na sam koniec realizowanego badania metodą NSS, kiedy to po 240 h detale skorodowały niemal całkowicie, za wyjątkiem zębów na kole zębatym a także w na kilku niewielkich obszarach wałka skrętnego.



Rys. 5. Koło zębate i wałek skrętny z pokryciem fosforanowym po 120 h (5.1) i po 240 h (5.2) badania korozyjnego metodą NSS

8. Podsumowanie i wnioski

- Wszystkie elementy konstrukcyjne badane metodą NSS skorodowały podczas próby co oznacza, że żadne z badanych pokryć galwanicznych nie zapewnia pełnej ochrony przed korozją w środowisku wody morskiej i mgły zawierającej chlorki.
- Najlepszą ochronę przed korozją zapewniło pokrycie fosforanowe. Było to jedyne pokrycie galwaniczne, na którym nie stwierdzono całkowitego skorodowania zębów na kole zębatym, ponieważ podczas produkcji zostały poddane procesowi nawęglania. W przypadku wałka skrętnego jedynie pojedyncze fragmenty na powierzchni wałka nie skorodowały.
- Koło zębate i wałek skrętny bez żadnego pokrycia galwanicznego uległy całkowitemu skorodowaniu po 120 h badania metodą NSS, podczas gdy części z pokryciem oksydowanym i oksydofosforanowym skorodowały niemal całkowicie po 240 h. W każdym przypadku, włącznie z pokryciem fosforanowym, zaobserwowano najszybszy przyrost korozji po 165 h badania metodą NSS.

9. Literatura

1. Ahmad Z.: Principles of corrosion engineering and corrosion control. IChemE, Burlington, MA, 2006, USA.
2. Al-Numan B., Cicek V.: Corrosion chemistry. John Wiley & Sons Ltd, 2011.
3. Bogucki K.: Magnetic tests of SNA - HP-59A kinematic connection details in the RD-33 engine. Journal of KONBiN, Vol. 50, Iss. 2, 2020, DOI 10.2478/jok-2020-0035.
4. CASTI Publishing Inc., Practical self-study guide to corrosion control. Edmonton 1998, Alberta, Canada.

5. Elboujdaini M., Ghali E., Sastri V.S.. Corrosion Prevention and Protection Practical Solutions”, John Wiley & Sons Ltd, 2007, Canada.
6. GOST 11268-76, Prokat tonkolistovoj specialnogo naznacenija iz konstrukcionnoj legirowannoj vysokokacestviennoj stali. Techničeskije uslovija.
7. GOST 4543-71, Prokat iz legirowannoj konstrukcionnoj stali. Techničeskije uslovija.
8. <http://www.profprokat.ru> - stal 12H2NWFA (EI712).
9. <http://www.totalmetall.com> - stal 18H2N4WA.
10. <https://www.micomlab.com/micom-testing/> - ISO 9227.
11. Jacobson G.: Impact, International Measures of Prevention, Application, and Economics of Corrosion Technologies Study. NACE International, 2016.
12. Liberti G.: Amorphous phosphating as a base for painting. Product Finishing, 1993.
13. PN-EN ISO 9227:2017-06 - Badania korozyjne w sztucznych atmosferach - Badania w rozpylonej solance.
14. Poradnik Galwanotechnika. Wydanie trzecie zmienione, Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
15. Sastri V.S.: Green corrosion inhibitors. John Wiley & Sons inc., Canada 2011.
16. Schlesinger M., Paunovic M.: Modern Electroplating. 5th edition, John Wiley & Sons inc., Hoboken, New Jersey, USA, 2014.
17. Schweitzer P.A.: Fundamentals of corrosion, Mechanisms, Causes, and Preventative Methods. CRC Press, Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, USA, 2010.
18. Schweitzer P.A.: Fundamentals of metallic corrosion, atmospheric and media corrosion of metals. CRC Press, Taylor & Francis Group 6000 Broken Sound Parkway NW, USA, 2007.

