

WERYFIKACJA MODELU OBLICZENIOWEGO DLA ZUŻYWANIA KOROZYJNO-MECHANICZNEGO

VERIFICATION OF COMPUTATIONAL MODEL FOR CORROSIVE AND MECHANICAL WEAR

W pierwszej części artykułu przedstawiono koncepcję modelowania procesu zużycia korozyjno-mechanicznego elementów węzła ślizgowego typu pin-on-disc. Model ten stanowi autorską syntezę rozwiązań cząstkowych uzyskanych przez innych badaczy. Celem syntezy było opracowanie skutecznego narzędzia do prognozowania skutków zużycia korozyjno-mechanicznego. Model zakłada, że mechanizmami determinującymi zużycie są niskocyklowe zmęczenie deformowanych (w strefie styku) przypowierzchniowych warstw materiału oraz korozja równomierna świeżo odsłoniętej powierzchni.

W drugiej części artykułu przedstawiono wyniki badań zużycia korozyjno-mechanicznego stali AISI 430 i AISI 321 w roztworze 0,5M H₂SO₄. Eksperymenty wykonano z wykorzystaniem specjalistycznego stanowiska z węzłem modelowym typu pin-on-disc. Stanowisko zaprojektowano i wykonano w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. W artykule zaprezentowano cząstkowe wyniki badań. Wybrane rezultaty umożliwiają identyfikację zależności między czynnikami wymuszającymi i szybkością zużycia korozyjno-mechanicznego. Dodatkowo wyniki badań posłużyły do weryfikacji metody badawczej oraz modelu obliczeniowego.

Słowa kluczowe: zużycie korozyjno-mechaniczne, model obliczeniowy, pin-on-disc.

The first part of the paper presents a corrosive and mechanical wear process of sliding pair elements type pin-on-disc. This model is the author's synthesis of partial solutions obtained by other research workers. The aim of the synthesis was to elaborate an effective instrument for forecasting the effects of the corrosive and mechanical wear. The model assumes that the mechanisms determining the wear is low-cycle fatigue of deformed (in the contact zone) near-surface material layers and uniform corrosion of a newly exposed surface.

The second part of the paper presents tests results of corrosive and mechanical wear of steel AISI 430 and AISI 321 in solution of 0.5M H₂SO₄. The experiments were performed with the use of a technical stand with a model pair type pin-on-disc. The stand was designed and executed in Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology. The paper presents partial tests results. The selected results enable to identify the dependence between forcing factors and corrosive and mechanical wear speed. Moreover, the tests results were also used for the verification of the applied test method and computational model.

Keywords: corrosive and mechanical wear, computational model, pin-on-disc.

1. Model obliczeniowy procesu zużycia korozyjno-mechanicznego

Artykuł dotyczy procesów zużycia, w których ubytek materiału jest wynikiem równoczesnego działania mechanicznych i chemicznych albo elektrochemicznych mechanizmów. W przypadku, kiedy znajdujący się w stanie pasywnym materiał ulega zużyciu tarciovemu w środowisku agresywnym, całkowity ubytek materiału różni się od wartości otrzymanej przez zsumowanie zużycia tarciovego zmierzonego w warunkach bez udziału korozji i zużycia korozyjnego obserwowanego przy braku tarcia. Tego rodzaju proces zużycia może stanowić istotny problem eksploatacyjny w węzłach tarciovych maszyn przemysłu chemicznego, naftowego, spożywczego.

Przegląd literatury [1,2,4,5] z zakresu matematycznego modelowania zużycia korozyjno-mechanicznego wskazuje, że żadna z prezentowanych koncepcji nie spełnia założeń kompleksowego algorytmu obliczeniowego. Wynika to przede wszystkim z braku całościowego ujęcia procesu. Większość opracowań koncentruje się wyłącznie na oddziaływaniach ko-

1. Computational model for corrosive and mechanical wear

The article deals with wear processes where the decrement of material is the result of mutual mechanical and chemical or electrochemical functioning. When a passive material is subjected to sliding wear in an aggressive environment, the total material decrement rate differs from that predicted by simply adding the wear rate measured in the absence of corrosion and the corrosion observed in the absence of wear. This kind of wear process can be essential as an operational problem in sliding pairs of machines in chemical, oil or foodstuff industry.

Literature review [1,2,4,5] concerning the mathematical modelling of corrosive and mechanical wear indicates that none of the presented ideas meets all assumptions of the complex computable algorithm. It arises mainly due to the lack of complete process presentation. Majority of elaborations concentrates only on corrosive interactions in friction conditions. Models where any phenomena causing the material loss were missed or significantly simplified cannot be treated as reliable analytic

rozrywnych w warunkach tarcia. Kluczową kwestią dla prawidłowego opisu zużywania w złożonych warunkach wymuszeń jest uchwycenie interakcji między elementarnymi procesami niszczącymi.

Autorzy artykułu przyjęli następujący model interpretacyjny zużywania korozyjno-mechanicznego. W czasie gdy elementy węzła pozostają w spoczynku ich powierzchnia może pokrywać się warstwą pasywnych tlenków. Z chwilą rozpoczęcia ruchu, wskutek względnych przemieszczeń, następuje usuwanie produktów korozji i odsłanianie fizycznie czystej powierzchni metalu. Następnie w obszarze rzeczywistego styku zachodzi odkształcenie powierzchni prowadzące do usunięcia fragmentu materiału podłoża. Na świeżo odsłoniętej powierzchni rozpoczynają się procesy elektrochemiczne (początkowo roztwarzanie anodowe później ponowna pasywacja). Następuje utlenianie materiału podłoża prowadzące do utworzenia nowej warstwy pasywnych tlenków.

Szkielet sformułowanego przez autorów artykułu algorytmu obliczeniowego stanowi model zaproponowany przez G.E. Łazarewa [5]. Jako uzupełnienie wprowadzono moduły pozyskiwania danych adekwatnych do rzeczywistych warunków eksploatacji. Przede wszystkim opracowano:

- moduł generowania przebiegu prądu korozyjnego – jego podstawę stanowi model wzrostu warstw pasywnych opisany w pracy [4],
- moduł symulujący zmiany chropowatości powierzchni – precyzyjna lokalizacja oddziaływań (wskazanie konkretnych mikronierówności) powinna umożliwić prognozowanie zmian mikrogeometrii powierzchni w powiązaniu z ogólnym modelem zużywania korozyjno-mechanicznego (proponycja własna autorów artykułu).

Utworzenie algorytmu obliczeniowego polegało na połączeniu wymienionych wyżej procedur w spójną strukturę. Koncepcję algorytmu oparto na trzech założeniach:

oddziaływania mechaniczne i korozyjne mają charakter cykliczny – każde z oddziaływań analizowane jest przez osobny blok procedur obliczeniowych w kolejności zgodnej z przyjętym modelem interpretacyjnym,

- każde z elementarnych oddziaływań zmienia stan powierzchni materiału wpływając w ten sposób na dalszy przebieg procesu zużywania – „dziedziczenie” skutków poprzedniego etapu oddziaływań wykorzystano w algorytmie do uwzględnienia interakcji między tarciami i korozją,
- ubytki materiału spowodowane elementarnymi procesami niszczącymi wyznaczane są na podstawie danych adekwatnych do rzeczywistych warunków eksploatacji – w bloku obliczeniowym każdego z oddziaływań znajduje się analityczny moduł pozyskiwania danych.

Szybkość zużywania mechanicznego obliczana jest na podstawie modelu zmęczenia odniesionego do styku mikronierówności powierzchni. Opisany przez ten model mechanizm niszczenia powierzchni zakłada oderwanie fragmentów deformowanych mikrowystępów po określonej liczbie oddziaływań stykowych (ściskanie i powrót do pierwotnego wymiaru). Takie ujęcie zjawisk mechanicznych ułatwia rozpoczęcie analizy procesów elektrochemicznych. Znane są bowiem rozmiary obszaru rzeczywistego styku oraz istnieje możliwość określenia momentu odsłonięcia „świeżej” powierzchni. Wiadomo zatem, kiedy rozpocznie się pasywacja i na jak dużej powierzchni będzie przebiegać. W omawianym algorytmie do oszacowania

research instruments. The key matter for the correct description of wear in complex input conditions is determining the interactions between elementary destructive processes.

The authors of the paper assumed the following corrosive and mechanical wear interpretive model. While the pair elements are at rest their surface can be covered with a layer of passive oxides. When they start the movement in the effect of relative displacements the corrosion products are removed and the clean metal surface is physically exposed. Then, in the region of the real contact the surface deformation takes place leading to the loss of the material base fragment. On the newly exposed surface the electrochemical processes start (at first anode digestion and then again the passivation). Next, material base oxidation leading to the creation of the new layer of passive oxides.

The frame of this paper author's computable algorithm is the model proposed by G.E. Łazarewa [5]. Modules of getting data respective to real service conditions are introduced as an addendum. First of all there are elaborated the following:

- a model of generating the course of corrosive current – its base is a model of passive layers increase described in the work [4],
- a modulus simulating changes of surface roughness – precise location of interactions (showing actual microroughness) should enable forecasting changes of surface microgeometry in relation with a general model of corrosive and mechanical wear (this paper author's own proposal).

Creation of computable algorithm lied in connecting the above mentioned procedures to obtain a coherent structure. The idea of algorithm was based on three assumptions:

- mechanical and corrosive interaction are of cyclic character – each interaction is analysed by a separate block of computable procedures in a sequence being in accordance with the assumed interpretive model,
- all elementary interactions change the condition of the material surface influencing the further wear process course – “inheriting” the effects of the previous step of interactions is used in the algorithm for taking into account the interactions between friction and corrosion,
- material losses caused by elementary destructive processes are determined on the basis of data relevant to real service conditions – in the computable block of every interaction you can find an analytic data gaining modulus.

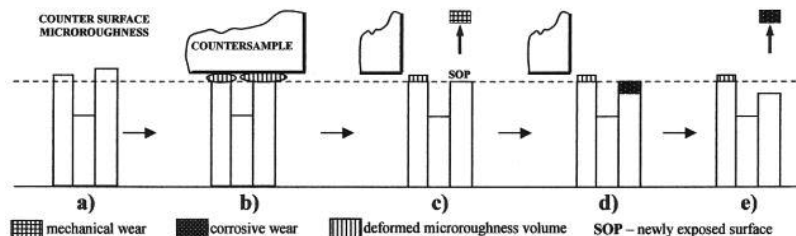
The mechanical wear speed is calculated on the basis of a fatigue model related to a surface microroughness contact. The surface destruction mechanisms described by this model assumes that fragments of deformed microprotrusions will break away after a certain number of contact interactions (compressing and return to previous state). Such presentation of mechanical phenomena makes starting the analysis of electrochemical processes easier as there is known the size of the area of the real contact and there is a possibility to determine the moment when the “fresh” surface will be exposed. So, we know when passivation is going to start and on how big area it will occur. In the discussed algorithm there was applied a Faraday equation for evaluation of intensity of material removal in the effect of corrosive interactions. Such method is used by the majority of research workers. However, the authors of the paper suggested the specific solution in which the current value necessary to carry out the calculations is determined in the analytic way. The module generating changes of current intensity was placed in

intensywności usuwania materiału wskutek oddziaływań korozyjnych zastosowano równanie Faradaya. Metodę taką wykorzystuje większość badaczy. Specyfika rozwiązania zaproponowanego przez autorów artykułu polega na tym, że niezbędna do przeprowadzenia owych obliczeń wartość prądu wyznaczana jest w sposób analityczny. W algorytmie umieszczono moduł generujący zmiany natężenia prądu na świeżo odsłoniętej powierzchni od momentu aktywacji do pełnej ponownej pasywacji. Takie rozwiązanie umożliwia otrzymanie charakterystyk elektrochemicznych adekwatnych do rzeczywistych warunków eksploatacji bez konieczności przeprowadzania eksperymentów. Interakcje między obu elementarnymi mechanizmami niszczącymi uwzględniono w sposób następujący:

- zużycie korozyjne wyznaczone jest tylko w tych obszarach, w których wcześniej nastąpiło oddzielenie materiału wskutek odkształceń mechanicznych (wpływ oddziaływań mechanicznych na przebieg procesów korozyjnych),
- po każdym cyklu oddziaływań zmienia się topografia powierzchni obszaru styku; istotną rolę odgrywa tutaj zużycie korozyjne stanowiące ponad połowę całkowitego ubytku materiału; zmiana chropowatości powierzchni wpłynie na częstotliwość i wartość odkształceń mechanicznych (wpływ korozji na przebieg procesów mechanicznych).

Całkowite zużycie korozyjno – mechaniczne wyznaczone jest jako algebraiczna suma obu składowych.

Wobec problemów związanych z opisem oddziaływań stykowych w oparciu o uśrednione charakterystyki chropowatości zaproponowano wykorzystanie numerycznego modelu mikrogeometrii analizowanego obszaru (rysunek 1). Na potrzeby procedury obliczeniowej przyjęto, że chropowata powierzchnia może być reprezentowana przez ortogonalny układ przylegających do siebie prostopadłościów. Każdy prostopadłościów odpowiada pojedynczej mikronierówności.



Rys. 1. Proces zużywania korozyjno-mechanicznego dla styku chropowatości: a) stan początkowy, b) deformacja elementów, c) usunięcie deformowanej części elementu i powstanie SOP, d) rozpuszczanie anodowe powierzchni elementu, e) ubytek masy

Fig. 1. Material surface destruction stages – model I: initial state, b) deformation of elements, c) elimination of deformed element and the origin of SOP, d) anodic solubility of the surface, e) mass decrease

W celu prognozowania zmian eksploatacyjnych powierzchni chropowatej postanowiono analizować oddziaływania korozyjne i mechaniczne w obszarze pojedynczych mikrowystępów. Działania te obejmują:

- a) zlokalizowanie mikrowystępów w obrębie których dojdzie do bezpośredniego styku współpracujących elementów; program każdorazowo wyznacza minimalne zbliżenie obu powierzchni zapewniające wzajemny styk takiej liczby występów, aby naprężenia rzeczywiste były równe twardości materiału,
- b) wyznaczenie ubytku materiału spowodowanego procesami korozyjnymi i mechanicznymi zachodzącymi

the algorithm on the newly exposed surface from the moment of activation to complete repassivation. Such solution makes possible obtaining electrochemical characteristics relevant to real service conditions without necessity to make experiments. Interactions between the two elementary destructive mechanisms have been taken into account as follows:

- corrosive wear is determined only in the areas where earlier material separation occurred as a result of mechanical deformations (the influence of mechanical interactions on the course of corrosive processes),
- after each cycle of interactions the surface topography in the contact area changes; corrosive wear being here over a half of the total material loss is very important; the change of material roughness will influence the frequency and value of mechanical deformations (the influence of corrosion on the course of mechanical processes).

The total corrosive and mechanical wear is determined as an algebraic sum of both components.

In the light of problems concerning the description of contact interactions basing on average roughness characteristics the use of numerical model of microgeometry of the analysed region (figure 1) was proposed. For the use of computable procedure, it has been assumed that a rough surface can be represented by an orthogonal system of cuboids being adherent one to another. Every cuboid corresponds to a single microroughness.

In order to forecast service changes of a rough surface there was a decision to analyse corrosive and mechanical interactions in the region of single microprotrusions. The action include:

- a) localizing microprotrusions where a direct contact of co-operating elements takes place; each time a programme determines minimal coming of both surfaces ensuring mutual contact of such number of protrusions to achieve real stresses equal material microhardness,
- b) determining the material loss caused by corrosive and mechanical processes occurring on the surface of microprotrusions selected in the point “a”,

na powierzchni mikrowystępów wyselekcjonowanych w punkcie „a”,

- c) skorygowanie wysokości mikronierówności stosownie do obliczonej całkowitej wartości zużycia.

Na podstawie zaprezentowanego modelu obliczeniowego opracowano program komputerowy, który pozwala prognozować ubytek materiału spowodowany jednoczesnymi oddziaływaniami mechanicznymi i korozyjnymi. Program prognozuje zużycie powierzchni próbki w skojarzeniu typu pin-on-disc [6,9].

2. Stanowisko badawcze

Eksperyment symulujący zużycie korozyjno-mechaniczne wykonano na stanowisku zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej, według koncepcji przedstawionej w pracy [3]. Węzeł modelowy stanowi twardy, nieodkształcalny trzpień, który ślizga się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki wykonanej ze stali wykazującej skłonność do pasywacji. Współpraca obu elementów pary ślizgowej odbywa się w środowisku elektrolitycznym. Do badań wykorzystano:

- trzpień wykonany z węgla spiekane; zakończenie trzpienia ma kształt ściętego stożka o kącie wierzchołkowym 40° ; średnica płaskiego końca wynosi około 0,5 mm; średnia chropowatość tej powierzchni kształtuje się na poziomie $R_a = 0,32 \mu\text{m}$,
- próbki w kształcie dysku o średnicy 10 mm i grubości 5 mm; średnia chropowatość powierzchni czołowej próbek kształtuje się na poziomie $R_a = 1,1 \mu\text{m}$.

W celu przeprowadzania badań procesu zużywania korozyjno-mechanicznego w środowiskach elektrolitycznych wykonano komorę z uchwytem dla próbki. W układzie stanowiska komora podtrzymywana jest przez statyw wyposażony w czujniki tensometryczne przeznaczone do pomiaru siły normalnej i siły tarcia w miejscu styku trzpienia z próbką. Ruch posuwisto-zwrotny trzpienia uzyskiwany jest przy pomocy mechanizmu mimośrodowego. Zastosowane rozwiązanie umożliwia przemieszczanie trzpienia z częstotliwością 1-10 Hz.

Do monitorowania zjawisk elektrochemicznych wykorzystano układ trójelektrodowy z precyzyjnym czterokanałowym potencjostatem ATLAS 9833. Elementy układu stanowią (rysunek 2):

- elektroda odniesienia – wykorzystano elektrodę kalomelową; potencjał tej elektrody względem elektrody wodorowej wynosi 244 mV,
- elektroda pomocnicza – funkcję tę pełni siatka platynowa o wymiarach $20 \times 140 \text{ mm}$, wykonana z drutu (PtRh10) o średnicy 0,06 mm,
- elektroda badana (próbka) z przewodem połączeniowym; poza powierzchnią czołową pokryta warstwą izolacji elektrycznej.

- c) correcting heights of microroughness respectively to the calculated total wear value.

On the basis of the presented computational models, a computer program was developed. It supports forecasting the decrement of material caused by mutual mechanical and corrosive reactions [6,9]. The program forecasts sample surface wear in sliding pairs pin-on-disc.

2. Test stand

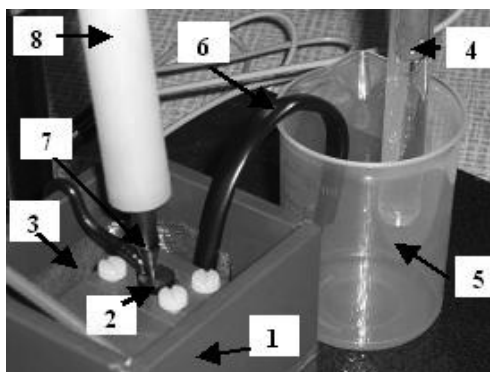
The experiment simulating the corrosive and mechanical wear was performed on the stand designed and executed in Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology according to the idea presented in the work [3]. The model system consists of a hard and non-deformable pin, which slides in reciprocating motion on the sample surface, which is made of steel susceptible to passivation. The collaboration of both elements of the sliding pair takes place in an electrolytic environment. The experiments involved the use of the following:

- a pin made of sintered carbide; the shape of the pin is a truncated cone (vertical angle 40°); the diameter of the flat end is about 0,5 mm, average roughness of this surface is about $R_a = 0,32 \mu\text{m}$,
- a disk-form sample, of the diameter of 10 mm, gauge 5 mm, and average roughness of the butting face about $R_a = 1,1 \mu\text{m}$.

In order to carry out tests of the corrosive and mechanical wear process in electrolytic environment, they made a chamber with a handle for the sample. In the stand system, the chamber is supported with a tripod equipped with strain gauges designed for measuring axial and friction forces in the contact place of the plunger and the sample. The plunger to-and-fro motion is obtained through the eccentric mechanism. The applied solution enables the plunger movement with frequency 1-10 Hz.

To monitor electro-chemical phenomena, they used a three-electrode system with a precise four-channel potentiostat ATLAS 9833. The elements of the system are as follows (figure 2):

- reference electrode – they used a calomel electrode; potential of this electrode in relation to the hydrogen electrode is 244 mV,
- counter electrode – this function is acted by the platinum net of dimensions $20 \times 140 \text{ mm}$, made of wire (PtRh10) of diameter 0.06 mm,
- working electrode (sample) with a connection cord; except for the front surface, the electrode is covered with the electric insulation layer.



Rys. 2. Węzeł tarcioy z układem elektrod do pomiarów elektrochemicznych: 1 – komora badawcza, 2 – elektroda badana, 3 – elektroda pomocnicza, 4 – elektroda odniesienia, 5 – dodatkowe naczynko elektrody odniesienia, 6 – klucz elektrolityczny, 7 – trzpień, 8 – tulejka mocowania trzpienia

Fig. 2. The friction pair with the system of electrodes for electro-chemical measurements: 1 – test chamber; 2 – working electrode, 3 – counter electrode, 4 – reference electrode, 5 – additional cell of reference electrode, 6 – electrolytic key, 7 – plunger, 8 – plunger fastening bush

3. Metoda badań

Przeprowadzone badania miały na celu:

- weryfikację zastosowanej metody badań poprzez porównanie wyników własnych eksperymentów z danymi literaturowymi [3],
- identyfikację zależności między czynnikami wymuszającymi i szybkością zużywania korozyjno-mechanicznego,
- weryfikację modelu obliczeniowego poprzez porównanie wyników badań i obliczeń.

Eksperymenty przeprowadzono dla dwóch stali:

- AISI 430 (16-18% Cr, 0,08% C),
- AISI 321 (17-19% Cr, 9-12% Ni, 0,4-0,7% Ti, 0,08% C).

Stal AISI 430 wybrano z uwagi na możliwość porównania wyników badań własnych z danymi literaturowymi. Jako bazę odniesienia przyjęto rezultaty badań Jemmely'ego [3]. Testy badawcze wykonano dla skrajnych wymuszeń stosowanych przez tego badacza:

- potencjał polaryzacji odpowiadający początkowi (-86 mV(SCE)) i końcowi (914 mV(SCE)) obszaru pasywnego – rysunek 3,
- naciski jednostkowe rzędu 8 i 45 MPa.

Drugą stal testową wybrano starając się zróżnicować pierwotne właściwości materiałowe mające wpływ na zużywanie korozyjno-mechaniczne. Stal AISI 321 posiada wyższą odporność na korozję. W przypadku stali AISI 321 wykonano badania tylko dla potencjału 350 mV(SCE) (początek obszaru pasywnego – rysunek 3). W tych warunkach spodziewano się najintensywniejszych oddziaływań elektrochemicznych. Ponadto w celu porównania wyników zużycia zastosowano te same wartości nacisków jednostkowych co w przypadku stali AISI 430.

Wszystkie testy wykonano w temperaturze 20-22°C wykorzystując roztwór 0,5M H₂SO₄. Trzpień przemieszczał się z częstotliwością 5 Hz na odcinku około 6 mm. Średnia prędkość trzpienia wynosiła w tych warunkach około 60 mm/s.

Przed każdym eksperymentem powierzchnię próbek oraz trzpienia myto. Dodatkowo próbki polerowano. Po zamontowaniu w komorze próbki poddawano polaryzacji. Najpierw przez 5 minut polaryzowano potencjałem katodowym a następnie przez około 30 minut zadany potencjałem z obszaru pasywnego. Po wstępnym przygotowaniu powierzchni próbek rozpoczynano zasadniczy test zużyciowy.

Po zakończeniu testu dokonywano oceny zużycia powierzchni próbek. Jako miarę zużycia przyjęto głębokość śladu zużycia wyznaczaną na podstawie pomiarów profilometrycz-

3. Method of tests

The purpose of the performed tests was:

- to verify the applied test method through the comparison of results of own experiments and literature data [3],
- to identify relationships between forcing factors and corrosive and mechanical wear speed,
- to verify the computational model through the comparison of results of tests and calculations.

The experiments were carried out for two steels:

- AISI 430 (16-18% Cr, 0,08% C),
- AISI 321 (17-19% Cr, 9-12% Ni, 0,4-0,7% Ti, 0,08% C).

The steel AISI 430 was selected due to the possibility of comparing the own tests results and the literature data. The Jemmely's tests results [3] were assumed as the reference base. The tests were made for extreme forcing applied by this research worker:

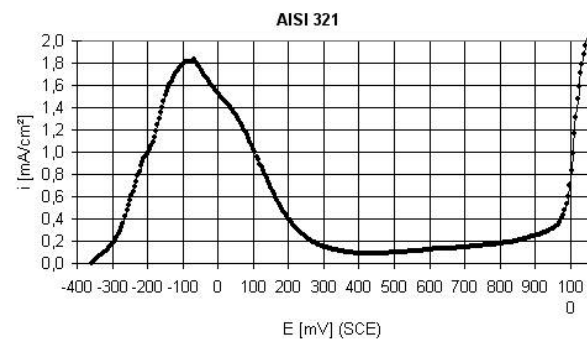
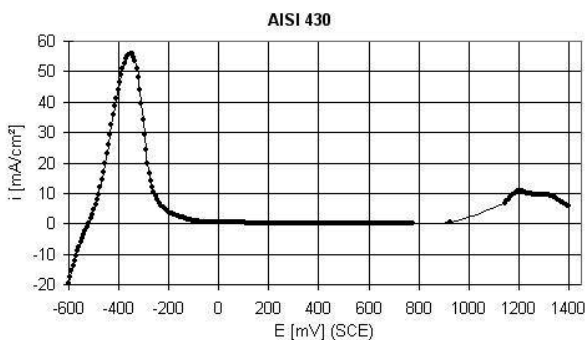
- polarisation potential respective to the beginning (-86 mV(SCE)) and the end (914 mV(SCE)) of the passive area – the figure 3,
- unit pressure order 8 and 45 MPa.

The next test steel was selected trying to differentiate the initial material properties influencing the corrosive and mechanical wear. The corrosion resistance of the steel AISI 321 is higher. In case of the steel AISI 321, they made tests only for potential 350 mV(SCE) (the beginning of the passive area – the figure 3). Under the conditions, they expected the most intensive electrochemical interactions. Besides, in order to compare the wear results they applied the same unit pressure values as in case of the steel AISI 430.

All the tests were carried out in the temperature 20-22°C using the solution 0.5M H₂SO₄. The plunger moved with the frequency 5 Hz on the section of about 6 mm. The average plunger speed, under the conditions, was about 60 mm/s.

Before each experiment the samples and plunger surfaces were washed. They also polished the samples. The samples were mounted in the chamber and then polarised. First, they were polarised with cathode potential for 5 minutes and then for about 30 minutes with set potential from the passive area. After the preliminary preparation of the samples, the essential wear test was started

After finishing the test, they evaluated the samples surface wear. As a wear measure they assumed the wear trace depth determined on the basis of profile measurements in the direction being perpendicular in relation to the contact surface. The sample result is presented in the figure 4. The visible trace maps

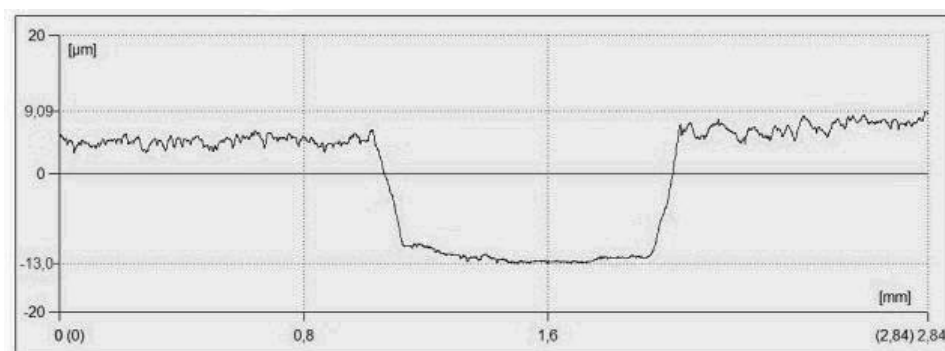


Rys. 3. Krzywe polaryzacji stali AISI 430 i AISI 321 (0,2 mV/s)

Fig. 3. Polarisation curves of the steel AISI 430 and AISI 321 in 0.5M H₂SO₄ (0.2 mV/s)

nych w kierunku prostopadłym do powierzchni styku. Przykładowy wynik przedstawiono na rysunku 4. Widoczny ślad dość dobrze odwzorowuje kształt trzpienia i umożliwia sprawne oszacowanie głębokości.

the plunger shape quite well making possible the effective evaluation of the depth.



Rys. 4. Profil śladu zużycia (AISI 321, 0,5M H₂SO₄, 350 mV(SCE), 45 MPa, 18000 przemieszczeń trzpienia)

Fig. 4. Wear trace profile (AISI 321, 0,5M H₂SO₄, 350 mV(SCE), 45 MPa, 18000 plunger movements)

Na rysunku 5 przedstawiono wyniki badań – głębokość śladu zużycia zmierzona na środku drogi trzpienia – dla stali AISI 321 w 0,5M H₂SO₄ przy nacisku w strefie styku 45 MPa i potencjale polaryzacji 350 mV(SCE). Wykres ilustruje wpływ liczby przemieszczeń trzpienia na głębokość śladu zużycia próbki. Widoczna liniowa zależność potwierdza, że konstrukcja stanowiska (kształt pary tarciowej) zapewnia stosunkowo stabilny przebieg procesu zużywania (stała intensywność zużywania). W dalszej części wyniki poszczególnych testów zostaną przedstawione w postaci szybkości zużywania jako przyrost głębokości zużycia odniesiony do jednego przemieszczenia trzpienia. Na rysunku 5 przedstawiono wyniki kilku testów o różnej liczbie przemieszczeń trzpienia (od 9000 do 30000). Kilkakrotnie powtarzano testy dla 18000 przemieszczeń trzpienia. Różnica między skrajnymi rezultatami a wartością średnią nie przekracza w tym przypadku 15%.

W trakcie testów dokonywano również pomiaru siły nacisku i siły tarcia w strefie styku węzła modelowego. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczano chwilowe wartości współczynnika tarcia. Parametr ten pozwala monitorować oddziaływania mechaniczne w strefie styku. Przykładowe, uśrednione przebiegi przedstawiono na rysunku 6. Poza momentem rozpoczęcia testu wartość współczynnika tarcia utrzymuje się na względnie stałym poziomie. Ewentualne wahania współczynnika tarcia w trakcie testu mogą wskazywać na zmianę warunków tribologicznych wynikającą z obecności ciał trzecich w strefie styku (cząstek zużycia) lub zmian mikrostrukturalnych na powierzchni próbki bądź trzpienia.

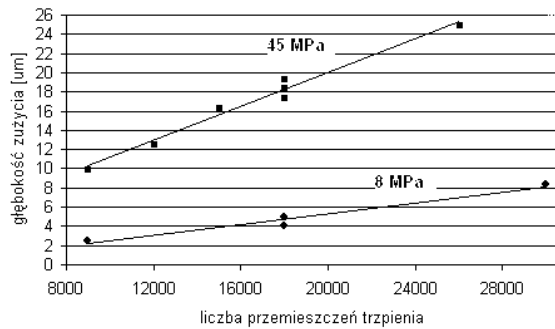
Rysunek 6 przedstawia zmiany natężenia prądu zmierzone w układzie próbka – elektroda pomocnicza (w obszarze zużycia) w trakcie eksperymentu. Prezentowane przebiegi zarejestrowano w trakcie 3 różnych testów dla stali AISI 321 w 0,5 M H₂SO₄ przy naciskach jednostkowych 45 MPa i potencjale 350 mV(SCE). W początkowym okresie każdego testu prąd może przyjmować stosunkowo duże wartości, co jest następstwem kształtowania się chropowatości eksploatacyjnej właściwej dla współpracujących elementów. Jednak w miarę trwania eksperymentu wartość prądu zaczyna oscylować wokół pewnej ustalonej wartości. Średnie wartości natężenia prądu dla prezentowanych testów mieszczą się w wąskim przedziale 1,2÷1,3 mA.

The figure 5 presents the test results – the wear trace depth measured in the middle of the plunger road – for the steel AISI 321 in 0.5M H₂SO₄ at pressure 45 MPa in the contact zone and polarisation potential 350 mV(SCE). The diagram illustrates the influence of the number of the plunger movements on the sample wear trace depth. The visible linear dependence confirms that the stand construction (the friction pair shape) ensures relatively stable course of the wear process (constant wear intensity). Later, the results of the individual tests will be presented in the form of wear speed as the wear depth increase referred to one plunger movement. The figure 5 shows the results of some tests of various numbers of plunger movements (from 9000 to 30000). The tests for 18000 plunger movements were repeated several times. In this case the difference between the extreme results and the average value did not exceed 15%.

During the tests they also made measurements of pressure and friction forces in the model pair contact zone. Basing on the obtained results the friction factor actual values were determined. This parameter allows to monitor mechanical interactions in the contact zone. The sample, average values are given in the figure 6. Apart from the moment of the test starting the friction factor is maintained on the relatively constant level. Possible fluctuations of the friction factor during the test can indicate changing tribological conditions arising from the presence of third bodies (wear particles) in the contact zone or micro-structural changes on the surface of the sample or the plunger.

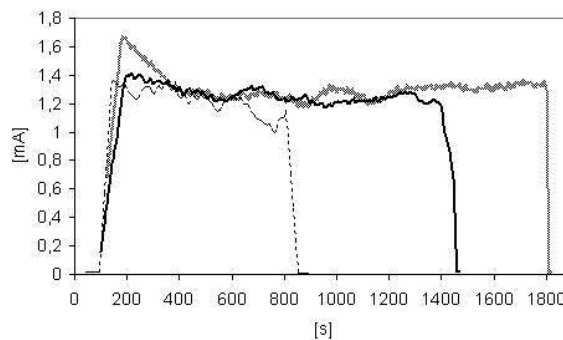
The figure 6 presents current intensity changes measured in the system sample – auxiliary electrode (in the wear area) during the experiment. The presented values were recorded during 3 different tests for the steel AISI 321 in 0.5M H₂SO₄ at unit pressures 45 MPa and potential 350 mV(SCE). At the beginning of each test this current can have relatively high values being the effect of occurring service roughness typical for interacting elements. However, in the course of the experiment the current value starts oscillating around a certain stable value. The average current intensity values for the presented tests are within the narrow range 1.2÷1.3 mA.

Figures 5-7 illustrate final effects (sample wear depth) and temporary symptoms (friction factor, current in the friction zone) of the corrosive and mechanical wear. The presented results show that the applied stand allows for recurrent modelling



Rys. 5. Głębokość śladu zużycia (AISI 321, 0,5M H₂SO₄)
 Fig. 5. Depth of wear trace (AISI 321, 0.5M H₂SO₄)

Rysunki 5-7 ilustrują ostateczne skutki (głębokość zużycia próbki) oraz chwilowe symptomy (współczynnik tarcia, prąd w strefie tarcia) procesu zużywania korozyjno-mechanicznego. Prezentowane wyniki świadczą, że zastosowane stanowisko pozwala w sposób powtarzalny modelować przebieg procesu zużywania korozyjno-mechanicznego elementów wężła pin-on-disc.

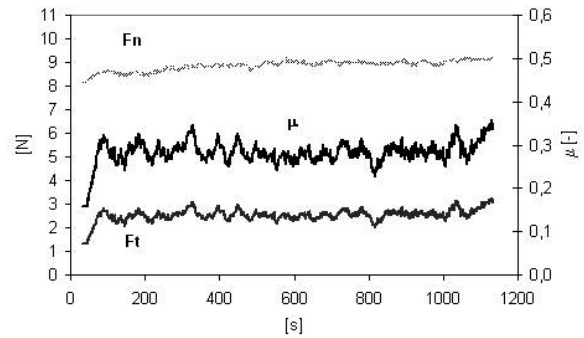


Rys. 7 Zmiany natężenia prądu w trakcie testu (AISI 321, 0,5M H₂SO₄, 45 MPa)
 Fig. 7 Current intensity changes during the test (AISI 321, 0.5M H₂SO₄, 45 MPa)

4. Wyniki badań zużycia korozyjno-mechanicznego

Zasadnicze wyniki badań wybranych stali dla zróżnicowanych wymuszeń mechanicznych i elektrochemicznych przedstawiono na rysunku 8. Wynik testu wyrażono jako przyrost głębokości zużycia odniesiony do jednego cyklu ruchu trzpienia (przesunięcie między skrajnymi położeniami). W przypadku stali AISI 430 oprócz rezultatów badań własnych zamieszczono wyniki uzyskane przez innych badaczy w podobnych warunkach [3]. Dla każdej z czterech serii eksperymentów wyniki badań autorów artykułu są zbliżone do danych literaturowych. Maksymalna różnica (dla wartości średnich) nie przekracza 15%. Można zatem uznać, że stanowisko badawcze wykonane w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej pozwala właściwie modelować proces zużywania korozyjno-mechanicznego elementów wężła typu pin-on-disc.

Dane zamieszczone na rysunku 8 wskazują, że w roztworze kwasu siarkowego wzrost nacisków powoduje zwiększenie zużycia. Przyrost potencjału prowadzi natomiast do mniejszego ubytku materiału. Relacje te są zgodne (w ujęciu jakościowym) z przebiegami natężenia prądu pokazanymi na rysunku 9. Rysunek przedstawia zmiany natężenia prądu w trakcie trwania eksperymentu przy różnych potencjałach polaryzacji i naciskach jednostkowych dla stali AISI 430. Początkowi testu tarcia odpowiada nagły przyrost wartości prądu. Przy braku tarcia w wężle prąd jest pomijalnie mały. Natężenie prądu podczas



Rys. 6. Siła nacisku (Fn), siła tarcia (Ft) i współczynnik tarcia (μ) dla wężła modelowego (AISI 321)

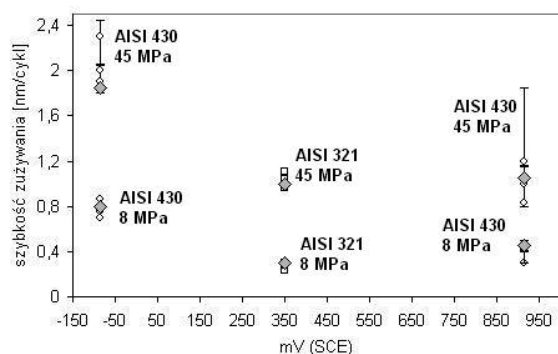
Fig. 6. Pressure force (Fn), friction force (Ft) and friction factor (μ) for model pair (AISI 321)

concerning the course of the corrosive and mechanical wear process of the pin-on-disc pair elements.

4. Tests results of corrosive and mechanical wear

The basic tests results for selected steels for differential mechanical and electro-chemical forcing are given in the figure 8. The test result is presented as a wear depth increase referred to one cycle of the plunger move (movement between extreme locations). In case of the steel AISI 430, beside the own tests results, the results obtained in similar conditions by other research workers [3] are given. For each four series of experiments the tests results of the authors of this paper are close to the literature data. The maximum difference (for average values) does not exceed 15%. So, it can be admitted that the test stand made in Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology allows for the right modelling of the corrosive and mechanical wear process of the pin-on-disc pair elements.

The data presented in the figure 8 show that in sulphuric acid solution the pressure increase causes the wear increase. The increase of potential, however, leads to smaller material loss. These relationships are coherent (from the point of view of quality) with current intensity courses shown in the figure 9. The figure shows current intensity changes occurring during the experiment at different polarization potentials and unit pressures for the steel AISI 430. The beginning of the friction test is connected with a sudden increase of the current value. When friction does not occur in the pair, current is negligibly small. The current intensity occurring during friction is higher in case



Rys. 8. Szybkość zużywania korozyjno-mechanicznego: (□, ○ - wyniki badań, ◇ - wyniki symulacji, I, — - zakres zmienności i wartość średnia dane [3])

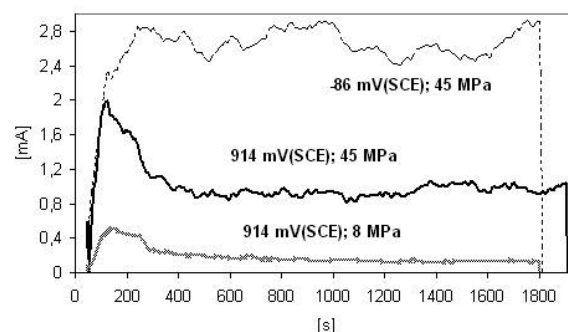
Fig. 8. Corrosive and mechanical wear speed: (□, ○ - tests results, ◇ - simulation results, I, — - given the reliability range and mean value [3])

tarcia jest większe w przypadku bardziej ujemnych potencjałów (w obszarze pasywnym) i wyższych nacisków jednostkowych. Zaobserwowana zależność ilustruje wpływ czynników mechanicznych na przebieg reakcji elektrochemicznych (znaczący udział interakcji w całkowitym zużyciu). Wzrost natężenia prądu spowodowany zwiększeniem nacisków jednostkowych można wytłumaczyć przyjmując założenie [3,5], że zasadnicze oddziaływania stykowe (usuwanie warstwy pasywnych tlenków) mają miejsce w obszarach rzeczywistego kontaktu mikrowystępów współpracujących elementów. Rzeczywista powierzchnia styku (stanowiąca część powierzchni nominalnej kontaktu) zwiększa się bowiem wraz z obciążeniem. Zatem stwierdzony związek między naciskami jednostkowymi i natężeniem prądu potwierdza słusność przyjętej przez autorów artykułu koncepcji analizowania mechanizmów zużywania w odniesieniu do pojedynczych mikrowystępów chropowatości powierzchni. Jest to jedno z podstawowych założeń autorskiego modelu obliczeniowego.

Szybkość zużywania korozyjno-mechanicznego stali AISI 321 jest mniejsza niż stali AISI 430 (porównując dane odpowiadające potencjałom początku pełnej pasywacji, odpowiednio 350 mV(SCE) i -86 mV(SCE)). Intensywność elementarnych procesów niszczących może być determinowana przez „pierwotne” właściwości skojarzenia materiałowego [8]. W każdej grupie materiałów można spodziewać się charakterystycznych relacji między składową mechaniczną i korozyjną. W warunkach, w których prowadzono badania proces zużywania determinowany był oddziaływaniami korozyjnymi (szacunkowe obliczenia na podstawie równania Faradaya i zarejestrowanych przebiegów prądu). Mniejszą szybkość zużywania stali AISI 321 można zatem wytłumaczyć wyższą odpornością na korozję (przy porównywalnych własnościach mechanicznych).

Wyniki badań wykorzystano również do weryfikacji programu komputerowego, którego algorytm omówiono na wstępie (rysunek 1). Rezultaty symulacji zamieszczono na rysunku 8. Obliczenia wykonano przyjmując dla obu stali charakterystyki mechaniczne na podstawie normy EN 10088. Porównując wyniki obliczeń z rezultatami badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- wszystkie wyniki obliczeń mieszczą się wewnątrz przedziału wyznaczonego przez skrajne rezultaty otrzymane podczas eksperymentów,
- maksymalne rozbieżności (odniesione do wartości średniej dla każdej serii pomiarowej) nie przekraczają: 15% w przy-



Rys. 9. Wpływ potencjału na wartość natężenia prądu w strefie tarcia
Fig. 9. The influence of potential on the current intensity value in the friction zone

of more negative potentials (in the passive area) and higher unit pressures. The observed dependence illustrates the influence of mechanical factors on the course of electrochemical reactions (important contribution of interactions in the whole wear). The current intensity increase caused by the increase of unit pressures can be explained with the use of the assumption [3,5], that the basic contact interactions (passive oxides layer removal) occur in the area of a real contact of micro-projections of mating elements. The real contact surface (being a part of the nominal contact surface) increases with load. So, the dependence between the unit pressures and the current intensity confirms that the idea - assumed by the authors' of this paper, concerning analysing wear mechanisms in relation to single micro-projections of surface roughness - is right. This is one of the most fundamental assumptions made by the authors' of this computational model.

The corrosive and mechanical wear speed of the steel AISI 321 is lower than the one in case of the steel AISI 430 (comparing data respective to potentials of the beginning of full passivation, 350 mV(SCE) and -86 mV(SCE), respectively). The intensity of elementary destructive processes can be determined by "primary" properties of the material pair [8]. In each material group, relationships between mechanical and corrosive component can be expected. In conditions in which the tests were carried out the wear process was determined by corrosive interactions (estimated calculations on the basis of the Faraday equation and the recorded current courses). So, slower wear of the steel AISI 321 can be explained by its higher corrosion resistance (at comparable mechanical properties).

The tests results were also used to verify a computer program which algorithm was discussed in the introduction (the figure 1). The simulation results are given in the figure 8. Computational experiments were performed for both kinds of steel in addition to characteristics from standard EN 10080. On the basis of performed analysis one can draw the following conclusions:

- all results of calculations obtained with the use of the own algorithm are within the range determined by extreme results obtained during experiments,
- the maximal discrepancies do not exceed 15% (AISI 430) and 12% (AISI 321) of mean value for the measuring series; at the present state of knowledge concerning corrosi-

padku stali AISI 430 oraz 12% w przypadku stali AISI 321; przy obecnym stanie wiedzy o zużywaniu korozyjno – mechanicznym zbieżność taką należy uznać za zadawalającą, - w analizowanym zakresie wyniki programu właściwie odzwierciedlają wpływ nacisków jednostkowych i stosowanego potencjału na intensywność zużywania korozyjno-mechanicznego.

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki eksperymentów pozwalają uznać wykorzystywane stanowisko badawcze za skuteczne narzędzie w zakresie badania procesu zużywania korozyjno-mechanicznego elementów węzła ślizgowego typu pin-on-disc. Zadawalająca (w obszarze tribologii) zgodność rezultatów obliczeń i badań świadczy o dość dobrym odzwierciedleniu w modelu symulacyjnym złożonych oddziaływań procesu zużywania korozyjno-mechanicznego. Mimo pozytywnej weryfikacji należy zauważyć, że zaprezentowany na wstępie model interpretacyjny mechanizmów niszczących nie wystarcza do opisanie wszystkich możliwych form zużywania w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjnych i mechanicznych. Podjęto zatem próbę poszukiwania alternatywnych metod matematycznego opisu zachodzących zjawisk. Wykorzystano modele mechaniki pęknięcia materiałów zakładając, że niszczenie elementu następuje wskutek propagacji mikroszczelin. Bazując na tej teorii sformułowano model matematyczny pozwalający prognozować przebieg procesów zużywania zachodzących w objętości elementów stalowych w warunkach jednoczesnych oddziaływań korozyjnych i mechanicznych [7]. Dalsze badania będą miały na celu zidentyfikowanie obszarów wymuszeń eksploatacyjnych, umożliwiających zastosowanie każdej z koncepcji modelowych.

6. Literatura

1. Abd-El-Kader H, El-Raghy S.M. Wear – corrosion mechanism of stainless steel in chloride media. *Corrosion Science* 1986; 26(8): 647-653.
2. Adler T.A, Walters R.P. Corrosion and wear of 304 stainless steel using a scratch test. *Corrosion Science* 1992; 33(12): 1855-1876.
3. Jemmely P, Mischler S, Landolt D. Tribocorrosion behavior of Fe-17Cr stainless steel in acid and alkaline solutions. *Tribology International* 1999; 32: 295-303.
4. Jemmely P, Mischler S, Landolt D. Electrochemical modeling of passivation phenomena in tribocorrosion. *Wear* 2000; 237: 63-76.
5. Lazarev G.E. Osnovnye zakonomernosti iznasivaniya korroziionnostojkich stalej i splavav pri trenii w elektrolitach. *Trenie i Iznos* 1987; 2: 223-230.
6. Stachowiak A. New means for calculating sliding pairs corrosive and mechanical wear. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn* 2007; 42: 44-51.
7. Stachowiak A, Zwierzycki W. Corrosive and mechanical wear as microcrack propagation. *Physicochemical Mechanics of Materials* 2008; 7: 30-34.
8. Zhang T.C, Jiang X.X, Li S.Z, Lu X.C. A quantitative estimation of the synergy between corrosion and abrasion. *Corrosion Science* 1994; 36(12): 1953-1962.
9. Zwierzycki W, Stachowiak A. Corrosive and mechanical wear calculation the integrated conception. *Physicochemical Mechanics of Materials* 2004; 4: 98-101.

ve and mechanical wear such identity should be regarded as satisfactory,
- in the analyzed range the programme results reflect properly the influence of stresses and applied potential to the intensity of corrosive and mechanical wear.

5. Summary

The experiments results presented in the paper allow for finding the applied test stand to be an effective tool for testing the corrosive and mechanical wear process of elements of the sliding pair type pin-on-disc. The satisfactory consistency (in the sphere of tribology) of calculations and tests results means that the simulation model has rather good correspondence of complex interactions in the corrosive and mechanical wear process. Apart from positive verification, it should be pointed out that the interpretive model of destructive mechanisms presented in the introduction is not satisfactory to describe all possible forms of wear in conditions of simultaneous corrosive and mechanical interactions. Therefore, there was made an attempt to search for alternative methods of mathematical description for occurring phenomena. They used models of material cracking mechanics assuming that the element destruction takes place in the effect of micro-slots propagation. Basing on this theory, they formulated a mathematical model allowing for forecasting the course of wear processes occurring in the volume of steel elements in conditions of simultaneous corrosive and mechanical interactions [7]. Further tests will aim at identifying areas of service forcing enabling the application of each model concept.

Prof. dr hab. inż. Wiesław ZWIERZYCKI
Dr inż. Arkadiusz STACHOWIAK

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych
Politechnika Poznańska
ul. Piotrwo 3, 60-965 Poznań
email: wieslaw.zwierzycki@put.poznan.pl, arkadiusz.stachowiak@put.poznan.pl
