

Arkadiusz STACHOWIAK*, Wiesław ZWIERZYCKI*

ZUŻYCIE KOROZYJNO-MECHANICZNE STALI 430 I 321 W WARUNKACH TARCIA ŚLIZGOWEGO

CORROSIVE AND MECHANICAL WEAR OF 430 AND 321 STEEL IN SLIDING FRICTION CONDITIONS

Słowa kluczowe:

zużycie korozyjno-mechaniczne, węzeł pin-on-disc

Key-words:

corrosive and mechanical wear, friction pair, pin-on-disc

Streszczenie

W artykule 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 Po-

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

znańskiej. W artykule zaprezentowano cząstkowe wyniki badań. Wybrane rezultaty umożliwiają identyfikację zależności między czynnikami wymuszającymi i szybkością zużycia korozyjno-mechanicznego. Dodatkowo wyniki badań posłużyły również do weryfikacji zastosowanej metody badawczej oraz opracowanego wcześniej modelu obliczeniowego.

MODEL OBLICZENIOWY PROCESU ZUŻYWANIA KOROZYJNO-MECHANICZNEGO

Zużywanie korozyjno-mechaniczne to proces, w którym ubytek materiału jest wynikiem równoczesnych oddziaływań mechanicznych i elektrochemicznych. W przypadku, kiedy znajdujący się w stanie pasywnym materiał ulega zużyciu tarcowemu w środowisku agresywnym, całkowity ubytek materiału różni się od wartości otrzymanej przez zsumowanie zużycia tarcowego zmierzonego w warunkach bez udziału korozji i zużycia korozyjnego obserwowanego przy braku tarcia. Tego rodzaju proces zużycia może stanowić istotny problem eksploatacyjny w węzłach tarcowych maszyn przemysłu chemicznego, naftowego, spożywczego [L. 1, 2].

Autorzy artykułu przyjęli następujący model interpretacyjny zużycia korozyjno-mechanicznego [L. 3, 4]. W czasie, gdy elementy wężła 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. Następuje utlenianie materiału podłoża prowadzące do utworzenia nowej warstwy pasywnych tlenków.

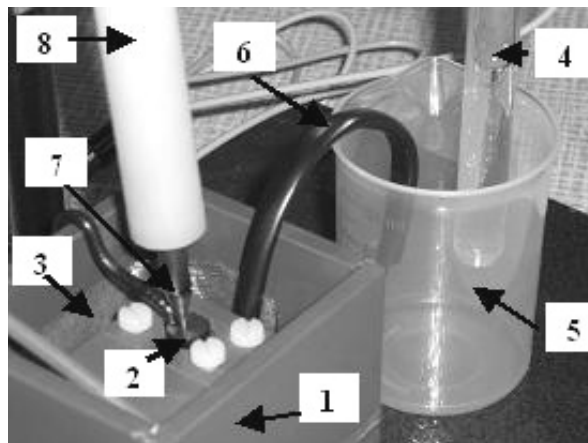
Na podstawie zaprezentowanej koncepcji opracowano program komputerowy, który pozwala prognozować ubytek materiału spowodowany jednoczesnymi oddziaływaniami mechanicznymi i korozyjnymi. Program prognozuje zużycie powierzchni próbki w skojarzeniu typu pin-on-disc [L. 3, 4].

STANOWISKO BADAWCZE

Eksperyment symulujący zużycie korozyjno-mechaniczne wykonano na stanowisku zaprojektowanym i wykonanym w Instytucie Maszyn Robo-

czych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. W projekcie wykorzystano koncepcję przedstawioną w pracy [L. 5]. Węzeł modelowy stanowi twardy, nieodkształcalny trzpień, który ślizga się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki wykonanej ze stali wykazującej skłonność do pasywacji (**Rysunek 1**). Współpraca obu elementów pary ślizgowej odbywa się w środowisku elektrolitycznym. Do badań wykorzystano:

- trzpień wykonany z węgla spiekanego; 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 próbki kształtuje się na poziomie $R_a = 1,1 \mu\text{m}$.



Rys. 1. Węzeł tarciový 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. 1. 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

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 za pomocą mechanizmu mimośrodowego. Zastosowane rozwiązanie umożliwia przemieszczania trzpienia z częstotliwością 1–10 Hz. Do monitorowania zjawisk elektrochemicznych wykorzystano układ trójelektrodowy z precyzyjnym czterokanałowym potencjostatem ATLAS 9833 (**Rysunek 1**). Jako elektrodę odniesienia wykorzystano elektrodę kalomelową. Funkcję elektrody pomocniczej pełni siatka platynowa o wymiarach 20 × 140 mm.

METODA BADAŃ

Przeprowadzone badania miały na celu:

- weryfikację zastosowanej metody badań poprzez porównanie wyników własnych eksperymentów z danymi literaturowymi [**L. 5**],
- identyfikację zależności między czynnikami wymuszającymi i szybkością zużywania korozyjno-mechanicznego,
- weryfikację modelu obliczeniowego poprzez porównanie wyników badań i obliczeń.

Eksperymenty przeprowadzono dla stali AISI 430 (16-18% Cr, 0,08% C) oraz 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. Testy badawcze wykonano dla skrajnych wymuszeń stosowanych przez Jemmely'ego [**L. 5**]:

- potencjał polaryzacji odpowiadający początkowi (-86 mV(SCE)) i końcowi (914 mV(SCE)) obszaru pasywnego,
- 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 ma wyższą odporność na korozję. W przypadku stali AISI 321 wykonano badania tylko dla potencjału 350 mV(SCE) (początek obszaru pasywnego). 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.

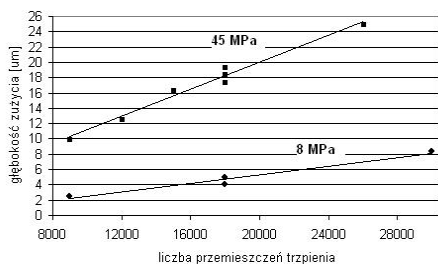
Wszystkie testy wykonano w temperaturze 20–22°C, wykorzystując roztwór 0,5M H₂SO₄. Trzpień przemieszczał się z częstotliwością 5 Hz

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 zadaniem 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 profilometrycznych w kierunku prostopadłym do powierzchni styku.

Na **Rysunku 2** 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. Na **Rysunku 2** 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%.

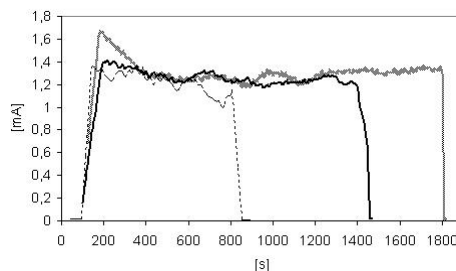
Rysunek 3 przedstawia zmiany natężenia prądu zmierzone w układzie próbka – elektroda pomocnicza w trakcie eksperymentu. Prezentowane przebiegi zarejestrowano w trakcie 3 różnych testów dla stali AISI 321 w 0,5M H₂SO₄ przy naciskach jednostkowych 45 MPa i potencjale 350 mV(SCE). W początkowym okresie 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.

Rysunki 2–3 ilustrują ostateczne skutki oraz chwilowe symptomy procesu zużywania korozyjno-mechanicznego. Prezentowane wyniki świadczą, że zastosowane stanowisko pozwala w sposób powtarzalny modelować przebieg procesu zużywania korozyjno-mechanicznego elementów węzła pin-on-disc.



Rys. 2. Głębokość śladu zużycia (AISI 321, 0,5M H₂SO₄)

Fig. 2. Depth of wear trace (AISI 321, 0,5M H₂SO₄)



Rys. 3. Zmiany natężenia prądu w trakcie testu (AISI 321, 0,5M H₂SO₄, 45 MPa)

Fig. 3. Current intensity changes during the test (AISI 321, 0,5M H₂SO₄, 45 MPa)

WYNIKI BADAŃ ZUŻYCIA KOROZYJNO-MECHANICZNEGO

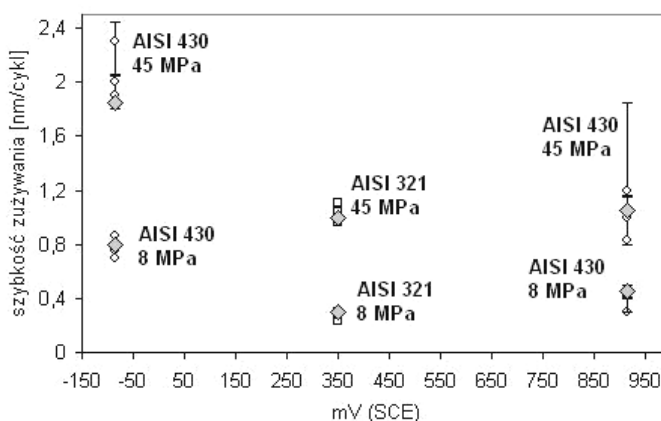
Zasadnicze wyniki badań wybranych stali dla zróżnicowanych wymuszeń mechanicznych i elektrochemicznych przedstawiono na **Rysunku 4**. Wynik testu wyrażono jako przyrost głębokości zużycia odniesiony do jednego cyklu ruchu trzpienia (przemieszczenie między skrajnymi położeniami). W przypadku stali AISI 430 oprócz rezultatów badań własnych zamieszczono wyniki uzyskane przez Jemmely'ego [L. 5]. 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 węzła typu pin-on-disc.

Wyniki badań wykorzystano również do weryfikacji programu komputerowego opracowanego przez autorów artykułu [L. 3, 4]. Rezultaty symulacji zamieszczono na **Rysunku 4**. 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 przypadku stali AISI 430 oraz 12% w przypadku stali AISI 321; przy obecnym stanie wiedzy

o zużywaniu korozyjno-mechanicznym zbieżność taką należy uznać za zadowalającą,

- c) w analizowanym zakresie wyniki programu właściwie odzwierciedlają wpływ nacisków jednostkowych i stosowanego potencjału na intensywność zużywania korozyjno-mechanicznego; w roztworze kwasu siarkowego wzrost nacisków powoduje zwiększenie zużycia, natomiast przyrost potencjału prowadzi do mniejszego ubytku materiału.



Rys. 4. Szybkość zużywania korozyjno-mechanicznego (□,○ – wyniki badań, ◇ – wyniki symulacji, I,— – zakres zmienności i wartość średnia dane [L. 5])

Fig. 4. Corrosive and mechanical wear speed (□,○ – tests results, ◇ – simulation results, I,— – given the reliability range and mean value [L. 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. Zadowalająca (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. W wielu sytuacjach eksploatacyjnych proces zużywania materiału determinowany jest propagacją pęknięcia. Dalsze prace będą

zatem zmierzały do poszukania alternatywnych metod matematycznego opisu zjawisk zachodzących w trakcie zużywania korozyjno-mechanicznego. W tym celu zostaną zaadaptowane modele mechaniki pęknięcia materiałów, zakładając że niszczenie elementu następuje wskutek propagacji mikroszczelin.

LITERATURA

1. Jemmely P., Mischler S., Landolt D.: Electrochemical modeling of passivation phenomena in tribocorrosion. *Wear*, vol. 237, 2000, s. 63–76.
2. Lazarev G.E.: Osnovnye zakonomernosti iznašivaniya korroziionnostojkich stalej i splavav pri trenii w elektrolitach. *Trenie i Iznos*, nr 2, 1987, s. 223–230.
3. Zwierzycki W., Stachowiak A.: Corrosive and mechanical wear calculation the integrated conception. *Problems of Corrosion and Corrosion Protection of Materials. Special Issue of Journal „Physicochemical Mechanics of Materials”* – nr 4, vol. 1, 2004, s. 98–101.
4. Stachowiak A.: New means for calculating sliding pairs corrosive and mechanical wear. *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, vol. 42, 2007, s. 44–51.
5. Jemmely P., Mischler S., Landolt D.: Tribocorrosion behavior of Fe-17Cr stainless steel in acid and alkaline solutions. *Tribology International*, vol. 32, 1999, s. 295–303.

Recenzent:
Marian SZCZEREK

Summary

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 one to identify the dependence between forcing factors and corrosive and mechanical wear speed. Moreover, the test results were also used for the verification of the applied test method and before the evaluated computational model.