

Arkadiusz STACHOWIAK*, Wiesław ZWIERZYCKI*

WPLYW WARUNKÓW WYMUSZEŃ NA ZUŻYWANIE TRIBOKOROZYJNE STALI AISI 304 W 0,5 M ROZTWORZE H₂SO₄

THE INFLUENCE OF THE CONDITIONS
OF INVESTIGATIONS ON TRIBOCORROSION OF STEEL
AIS I 304 IN SOLUTION OF 0.5 M H₂SO₄

Słowa kluczowe:

tribokorożja, skojarzenie pin-on-plate, zużycie

Key words:

tribocorrosion, model pair type pin-on-plate, wear

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki badań zużywania tribokorozyjnego stali AISI 304 w 0,5M roztworze H₂SO₄. Badania wykonano na prototypowym stanowisku typu pin-on-plate zaprojektowanym w Instytucie Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej. Węzeł modelowy stanowi twardy, nieodkształcalny trzpień, który ślizga

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

się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki na dystansie około 6 mm. Stanowisko wyposażono w układ do polaryzacji próbki zadaniem potencjałem i pomiaru prądu z obszaru tarcia. Celem eksperymentu była analiza wpływu na intensywność ubytku materiału w warunkach tribokorozji następujących wymuszeń: nacisk nominalny, częstotliwość przemieszczeń trzpienia, potencjał polaryzacji, średnica trzpienia.

WPROWADZENIE

W wielu przypadkach powierzchnie elementów maszyn współpracujących w styku ślizgowym narażone są na oddziaływania korozyjne ze strony medium technologicznego [L. 1]. Zużycie powodowane jednoczesnym działaniem tarcia i korozji (tribokorozja) może stanowić istotny problem eksploatacyjny w takich dziedzinach jak: przemysł chemiczny, spożywczy, naftowy. Intensywność tribokorozji zależy od pierwotnych cech materiałów, z których wykonane są elementy węzła oraz warunków wymuszeń. Wpływ wymuszeń na przebieg tribokorozji analizowano w pracach [L. 2–6]. Autorzy artykułu podjęli próbę ilościowej oceny tych relacji dla stali austenitycznej AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 dla skojarzenia typu pin-on-plate. Za istotne czynniki wymuszające uznano:

- nacisk nominalny (12 i 45 MPa),
- częstotliwość przemieszczeń trzpienia (2 i 5 Hz),
- potencjał polaryzacji (skrajne wartości dla stanu pasywnego: 100 i 700 mV(SCE)),
- średnicę trzpienia ϕ_T (0,5 i 1,5 mm).

METODA I WYNIKI BADAŃ TRIBOKOROZJI

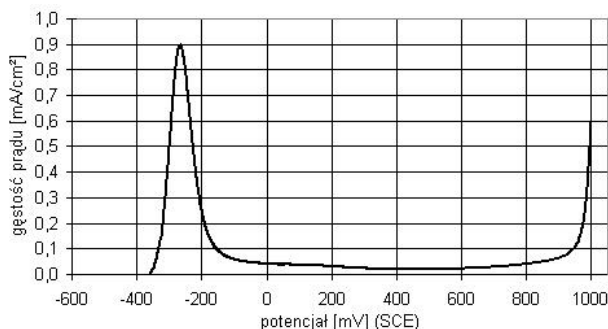
Badania procesu tribokorozji wykonano na specjalistycznym stanowisku zaprojektowanym i wykonanym w Politechnice Poznańskiej. Szczegółowy opis stanowiska i metody badawczej zamieszczono w pracach [L. 7, 8]. Węzeł modelowy stanowi skojarzenie typu pin-on-plate współpracujące w środowisku o charakterze elektrolitycznym. Trzpień wykonany jest z węgla spiekane (WC) pokrytego warstwą azotku tytanu (TiN) – twardość około 2000 HV. Trzpień ma kształt ściętego stożka i wykonuje ruch posuwisto-zwrotny po powierzchni próbki na dystansie około 6 mm. Ruch posuwisto-zwrotny trzpienia uzyskiwany jest przy pomocy mechanizmu mimośrodowego. Do monitorowania zjawisk elektrochemicznych wykorzystano układ trójelektrodowy z precyzyjnym czterokanałowym

potencjostatem ATLAS 9833. Jako elektrodę odniesienia wykorzystano elektrodę kalomelową (SCE). Układ umożliwia polaryzację próbki zadanym potencjałem oraz pomiar prądu z obszaru tarcia.

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 w połowie długości drogi tarcia.

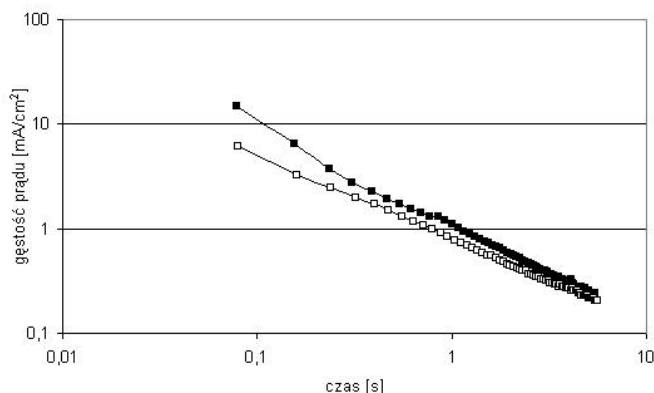
Badania wykonano dla stali AISI 304 o twardości 300 HV_{0,2}. Na **Rys. 1** przedstawiono krzywą polaryzacji badanej stali w 0,5 M roztworze H₂SO₄. Dokonano również oceny skłonności stali do tworzenia warstw pasywnych. Badania kinetyki procesu pasywacji zrealizowano zgodnie z koncepcją przedstawioną w pracach [L. 8, 9]. Eksperyment realizowano na dwóch etapach. W trakcie pierwszego etapu przez 15 minut polaryzowano powierzchnię próbki potencjałem katodowym (około 0,3 V niższym od potencjału stacjonarnego). Na drugim etapie w sposób skokowy zwiększano potencjał do zadanej wartości i monitorowano zmiany natężenia prądu. Na **Rysunku 2** przedstawiono przebiegi prądu pasywacji wyznaczone dla dwóch wartości potencjału polaryzacji: 100 i 700 mV(SCE) – skrajne wartości dla stanu pasywnego.

W **Tabeli 1** przedstawiono wyniki badań procesu tribokorozji stali AISI 304 w 0,5M roztworze H₂SO₄ dla skojarzenia pin-on-plate w warunkach polaryzacji potencjałem z zakresu pasywacji. Dla poszczególnych grup wymuszeń wykonano od 3 do 11 testów. Wyniki testów przedstawiono jako przyrost głębokości śladu zużycia odniesiony do jednego przemieszczenia trzpienia ([nm/cykl]) oraz do jednostki czasu ([nm/s]).



Rys. 1. Krzywa polaryzacji stali AISI 304 w 0,5 M roztworze H₂SO₄ (prędkość polaryzacji 2 mV/s)

Fig. 1. Potentiodynamic polarization curve for steel AISI 304 in 0.5 M H₂SO₄ solution (sweep rate 2 mV/s)



Rys. 2. Prąd pasywacji stali AISI 304 w 0,5 M roztworze H_2SO_4 dla różnych potencjałów polaryzacji: ■ – 100 mV(SCE), □ – 700 mV(SCE)

Fig. 2. Passivation current for steel AISI 304 in 0.5 M H_2SO_4 solution at various potentials: ■ – 100 mV(SCE), □ – 700 mV(SCE)

Zdjęcia mikroskopowe i pomiary profilometryczne powierzchni śladu zużycia wskazują, że w analizowanych warunkach ubytek materiału powodowany jest głównie mikroskrawaniem podatnej powierzchni próbki przez twarde występy chropowatości trzpienia [L. 7, 8]. W miejscach, w których nastąpiło mechaniczne oddzielenie materiału próbki, inicjowane są intensywne procesy elektrochemiczne (roztwarzanie anodowe, pasywacja). Analizy obliczeniowe przedstawione w pracach [L. 7, 8] wskazują, że wspomniane procesy są głównym czynnikiem determinującym ubytek materiału w badanym węzle (powyżej 60%). Dla zilustrowania intensywności tych oddziaływań na Rys. 3 i 4 przedstawiono przebiegi prądu tribokorozji charakterystyczne dla poszczególnych wymuszeń.

Tabela 1. Wyniki badań tribokorozyjnych (AISI 304, 0,5 M H_2SO_4)

Table 1. Results of tribocorrosion experiment (AISI 304, 0.5 M H_2SO_4)

nacisk jednostkowy	potencjał polaryzacji	częstotliwość ruchu trzpienia	średnica trzpienia (ϕ_T)	intensywność zużywania tribokorozyjnego		
				zakres	wartość średnia	
[MPa]	[mV(SCE)]	[Hz]	[mm]	[nm/cykl]	[nm/cykl]	[nm/s]
12	100	5	0,5	0,47–0,56	0,52	5,2
45				1,45–1,65	1,61	16,1
12	700			0,32–0,42	0,37	3,7
45				1,08–1,19	1,14	11,4
45	100	2	1,51–1,75	1,65	6,6	
12		5	1,5	0,78–0,92	0,85	8,5

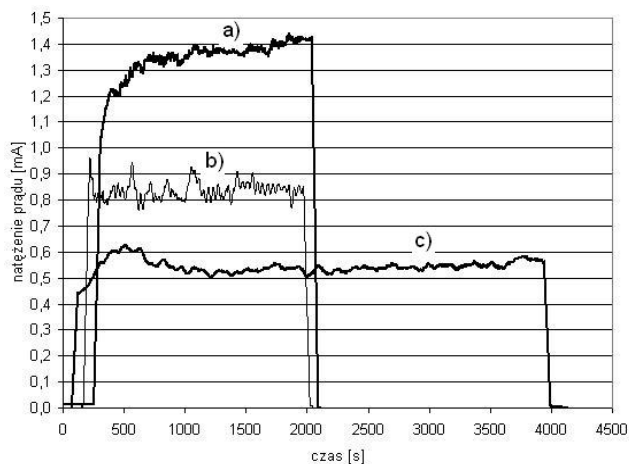
Przedstawione w **Tabeli 1** wyniki badań tribokorozji wskazują, że wzrost nacisków jednostkowych w obszarze styku tarcowego powoduje zwiększenie intensywności usuwania materiału. Obserwowana zależność jest zgodna z modelem zużywania Archarda [**L. 5**]. Wzrost siły obciążającej nominalną powierzchnię styku (pod trzpieniem) skutkuje zwiększeniem rzeczywistej powierzchni kontaktu. Większy jest zatem obszar, w obrębie którego może nastąpić mechaniczne usunięcie materiału próbki i odsłonięcie świeżej powierzchni.

Większa częstotliwość ruchu posuwisto-zwrotnego trzpienia powoduje częstsze oddziaływania między twardymi występami chropowatości trzpienia i podatną powierzchnią próbki. Skutkuje to wzrostem liczby przypadków mechanicznego oddzielenia materiału próbki (w odniesieniu do jednostki czasu) i w rezultacie również wyższą wartością prądu tribokorozji (**Rys. 3**). Wyższej częstotliwości ruchu trzpienia odpowiadają większe wartości intensywności zużywania (**Tabela 1**).

Dla oceny wpływu wymiarów nominalnej powierzchni styku na intensywność tribokorozji wykonano badania porównawcze z wykorzystaniem trzpienia o większej średnicy $\phi_T = 1,5$ mm. Przy tej samej wartości nacisków jednostkowych (około 12 MPa) stwierdzono większy ubytek materiału odpowiadający jednemu przemieszczeniu trzpienia. Główną przyczyną takiego stanu może być dłuższa droga tarcia pod przemieszczającym się trzpieniem. Sprzyja to częstszym oddziaływaniom stykowym prowadzącym do intensywniejszego mechanicznego oddzielenia materiału próbki.

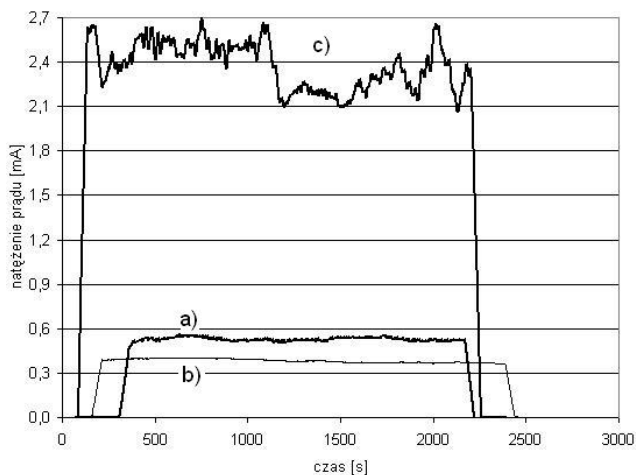
Przeprowadzone badania ilustrują również wpływ potencjału polaryzacji na przebieg tribokorozji. Uzyskane wyniki (**Tabela 1**) wskazują, że przy wyższym potencjale polaryzacji (dla stanu pasywnego) maleje intensywność tribokorozji. Mając na uwadze dominujący udział zużywania korozyjnego w całkowitym ubytku materiału zaobserwowaną relację można wyjaśnić na podstawie charakterystyki materiałowej stali AISI 304 przedstawionej na **Rys. 2**. W warunkach wyższego potencjału szybciej następuje repasywacja, a procesowi temu towarzyszą niższe wartości prądu.

Przedstawione powyżej związki między intensywnością tribokorozji i stosowanymi wymuszeniami dla stali AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 zgodne są z wynikami badań stali ferrytycznej AISI 430 zamieszczonymi w pracy [**L. 4**].



Rys. 3. Zmiany prądu tribokorozji w skojarzeniu ślizgowym dla stali AISI 304 w 0,5 M roztworze H_2SO_4 dla nacisku jednostkowego 45 MPa: a) 100 mV(SCE), 5 Hz, b) 700 mV(SCE), c) 100 mV(SCE), 2 Hz

Fig. 3. Evolution with time of the current during sliding for steel AISI 304 an pin in 0.5 M H_2SO_4 at pressure 45 MPa: a) 100 mV(SCE), 5 Hz, b) 700 mV(SCE), 5 Hz, c) 100 mV(SCE), 2 Hz



Rys. 4. Zmiany prądu tribokorozji w skojarzeniu ślizgowym dla stali AISI 304 w 0,5 M roztworze H_2SO_4 dla nacisku jednostkowego 12 MPa: a) 100 mV(SCE), 5 Hz, $\phi_T = 0,5$ mm, b) 700 mV(SCE), 5 Hz, $\phi_T = 0,5$ mm, c) 100 mV(SCE), 5 Hz, $\phi_T = 1,5$ mm

Fig. 4. Evolution with time of the current during sliding for steel AISI 304 an pin in 0.5 M H_2SO_4 at pressure 12 MPa: a) 100 mV(SCE), 5 Hz, $\phi_T = 0.5$ mm, b) 700 mV(SCE), 5 Hz, $\phi_T = 0.5$ mm, c) 100 mV(SCE), 5 Hz, $\phi_T = 1.5$ mm

PODSUMOWANIE

W artykule zidentyfikowano eksperymentalnie relacje między intensywnością tribokorozji i warunkami wymuszeń dla stali austenitycznej AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 . Obniżenie intensywności tribokorozji można uzyskać zmniejszając – w miarę możliwości – naciski jednostkowe, częstotliwość oddziaływań tarciovych współpracujących elementów oraz wymiary strefy styku. Istotnym czynnikiem zmniejszającym zużycie może być także polaryzacja wężła odpowiednio wysokim potencjałem z zakresu pasywacji.

Analizowane wymuszenia wpływają na intensywność tribokorozji przede wszystkim poprzez kształtowanie wartości prądu w obszarze tarcia w wyniku zmiany:

- gabarytów powierzchni, na której usuwane są pasywne tlenki podczas pojedynczego przemieszczenia trzpienia (nacisk jednostkowy, średnica trzpienia),
- częstotliwości usuwania pasywnych tlenków na danym obszarze drogi tarcia w trakcie cyklicznego ruchu trzpienia (częstotliwość ruchu trzpienia),
- kinetyki procesu repasywacji (potencjał polaryzacji).

Opisane w artykule prawidłowości charakteryzują proces tribokorozji stali nierdzewnej w węźle ślizgowym typu pin-on-plate w warunkach polaryzacji potencjałem z zakresu pasywacji.

LITERATURA

1. Mathew M.T., Srinivasa Pai P., Pourzal R., Fischer A., Wimmer M.A.: Significance of tribocorrosion in biomedical applications: overview and current status. *Advances in Tribology*, 2009.
2. Lazarev G.E.: Osnovnye zakonomernosti iznašivanija korroziionnostojkich stalej i splavav pri trenii w elektrolitach. *Trenie i Iznos*, 1987, nr 2, s. 223–230.
3. Mischler S., Debaud S., Landolt D.: Wear-accelerated corrosion of passive metals in tribocorrosion systems. *Journal of Electrochemical Society*, 1998, vol. 145, s. 750–758.
4. Jemmely P., Mischler S., Landolt D.: Tribocorrosion behavior of Fe-17Cr stainless steel in acid and alkaline solutions. *Tribology International*, 1999, vol. 32, s. 295–303.
5. Landolt D., Mischler S., Stemp M.: Electrochemical methods in tribocorrosion: a critical appraisal. *Electrochimica Acta*, 2001, vol. 46, s. 3913–3929.

6. Jiang J., Stack M.M., Neville A.: Modelling the tribo-corrosion interaction in aqueous slipping conditions. *Tribology International*, 2002, vol. 35, s. 669–679.
7. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Verification of computational model for corrosive and mechanical wear. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2009, vol. 44, nr 4, s. 28–36.
8. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Tribocorrosion modeling of stainless steel in a sliding pair of pin-on-plate type. *Tribology International*, 2011, vol. 44, s. 1216–1224.
9. Jemmely P., Mischler S., Landolt D.: Electrochemical modeling of passivation phenomena in tribocorrosion. *Wear*, 2000, vol. 237, s. 63–76.

Recenzent:
Janusz JANECKI

Summary

The paper presents the results of tests of tribocorrosion wear of stainless steel AISI 304 in solution of 0.5M H₂SO₄. The experiments were carried out on a technical stand with a model pair type pin-on-disc. The stand was designed and implemented in the Institute of Machines and Motor Vehicles of Poznań University of Technology. 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 analysis of the influence of the following factors was the aim of the experiment on the intensity of the decrease of material in conditions of tribocorrosion: nominal pressure, frequency of the stroke of the pin, and the applied potential the diameter of the pin.