

Arkadiusz STACHOWIAK*, Wiesław ZWIERZYCKI*

TWORZENIE MAP ZUŻYCIA DLA PROCESU TRIBOKOROZJI W WĘZŁACH ŚLIZGOWYCH NA PRZYKŁADZIE STALI ODPORNYCH NA KOROZJĘ

THE CREATION OF WEAR MAPS FOR TRIBOCORROSION IN SLIDING PAIRS: THE CASE OF STAINLESS STEEL

Słowa kluczowe:

tribokorożja, model, węzeł pin-on-plate, mapa zużycia

Key words:

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

Streszczenie

W artykule przedstawiono mapę zużycia ilustrującą intensywność tribokorożji stali AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 w zakresie nacisków od 1 do 45 MPa przy częstotliwości wymuszeń mechanicznych od 2 do 5 Hz. Dla skrajnych wymuszeń intensywność zużywania wyznaczono eksperymentalnie. Badania wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem modelowym typu pin-on-plate. Do oszacowania intensywności tribokorożji w obszarze wymuszeń po-

* Politechnika Poznańska, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. (61) 665-26-55, fax (61) 6652855, e-mail: wieslaw.zwierzycki@put.poznan.pl, e-mail: arkadiusz.stachowiak@put.poznan.pl.

średnich wykorzystano autorski model symulacyjny. Uzyskana mapa zużycia pozwala określić wpływ warunków eksploatacji na intensywność usuwania materiału w węzle ślizgowym podczas tribokorozji.

WPROWADZENIE

W ostatnich latach dokonano znaczącego postępu w zakresie rozwoju metodologii konstruowania map zużycia [L. 1–3]. Mapa zużycia pozwala ulokować dominujące mechanizmy zużywania w sparametryzowanym obszarze wymuszeń. Metoda ta stanowi potężne narzędzie do analizy mechanizmów uszkodzeń materiałów, optymalizacji doboru materiałów oraz warunków eksploatacji. Ostatnio opracowane zostały mapy zużycia dla zużywania korozyjno-erozyjnego w funkcji sparametryzowanych wymuszeń [L. 4]:

- mechanicznych (σ/H) – iloraz nacisków jednostkowych w węzle ślizgowym (σ) i twardości materiału (H),
- elektrochemicznych (τ_s/τ_0) – stosunek czasu (τ_s) między kolejnymi oddziaływaniami stykowymi w danym miejscu powierzchni zużycia do charakterystycznego czasu (τ_0) niezbędnego do pełnej pasywacji materiału.

Jednym z nielicznych opracowań w zakresie tworzenia map zużycia dla tribokorozji jest praca Jianga J. ze współpracownikami [L. 5]. Wspomniani autorzy wykorzystali własny model obliczeniowy tribokorozji i adaptując koncepcję tworzenia mapy zużycia przedstawioną w pracy [L. 4], opracowali uproszczoną mapę zużycia tribokorozyjnego. Utworzona przez Jianga mapa stanowi efekt teoretycznych analiz i ma charakter bardzo ogólny. Ilustruje w ujęciu jakościowym wpływ wymuszeń na relacje między zużyciem spowodowanym procesami elektrochemicznymi i zużyciem związanym z oddziaływaniami tarciovymi. Autorzy artykułu postanowili sporządzić mapę tribokorozji dla wybranej stali, wyznaczając rzeczywiste wartości zużycia dla różnych wymuszeń mechanicznych oraz elektrochemicznych.

TWORZENIE MAPY TRIBOKOROZJI

Autorzy artykułu opracowali mapę zużycia tribokorozyjnego dla stali AISI 304 w węzle ślizgowym typu pin-on-plate. Eksperymenty wykonano w 0,5M roztworze H_2SO_4 przy następujących zakresach wymuszeń:

- naciski jednostkowe: od 12 do 45 MPa,
- częstotliwość przemieszczeń trzpienia: od 2 do 5 Hz,
- potencjał: 100 i 700 mV(SCE) – skrajne wartości obszaru pasywnego.

Dla skrajnych wymuszeń intensywność zużywania wyznaczono eksperymentalnie. Do oszacowania intensywności tribokorozji w obszarze wymuszeń pośrednich wykorzystano autorski model symulacyjny [L. 6]. Na potrzeby modelu chropowate powierzchnie współpracujących elementów węzła pin-on-

-plate przedstawiono jako układ przylegających do siebie prostopadłościanów. Poszczególne prostopadłościany odpowiadają pojedynczym występom chropowatości. Dla każdego położenia trzpienia na drodze tarcia identyfikowane są występy tworzące rzeczywistą powierzchnię styku. Kryterium identyfikacji stanowi równość rzeczywistych naprężeń stykowych i twardości materiału. W tak zidentyfikowanym obszarze następuje analiza stanu odkształceń i naprężeń. Model uwzględnia dwa mechanizmy prowadzące do oderwania odkształcanego „wierzchołka” występu chropowatości: mikroskrawanie oraz zmęczenie niskocyklowe. W miejscach, w których nastąpiło mechaniczne oddzielenie materiału, inicjowane są procesy elektrochemiczne. Model prognozuje kinetykę tych procesów (repasywacji) i szacuje ubytek korozyjny.

Badania procesu tribokorozji wykonano na specjalistycznym stanowisku z węzłem typu pin-on-plate zaprojektowanym i wykonanym w Politechnice Poznańskiej [L. 6, 7]. Zastosowano trzpień wykonany z węgla spiekane go w kształcie ściętego stożka o średnicy płaskiego końca 0,5 mm. Trzpień przemieszczał się ruchem posuwisto-zwrotnym po powierzchni próbki na dystansie około 6 mm. Do monitorowania zjawisk elektrochemicznych wykorzystano układ trójelektrodowy z potencjostatem ATLAS 9833. Jako elektrodę odniesienia wykorzystano elektrodę kalomelową (SCE). Oceny zużycia powierzchni próbek dokonywano po zakończeniu testu. Jako miarę zużycia przyjęto głębokość śladu zużycia wyznaczaną na podstawie pomiarów profilometrycznych w połowie długości drogi tarcia. Dla poszczególnych grup wymuszeń wykonano 3–11 testów.

Tabela 1. Wyniki badań i obliczeń tribokorozji

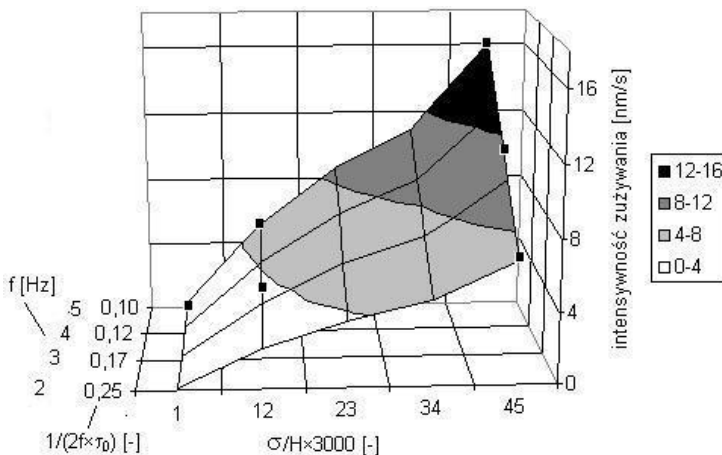
Table 1. Results of experiments and calculation of tribocorrosion

Nacisk (σ)	Potencjał polaryzacji (e)	Częstotliwość ruchu trzpienia (f)	Parametr wymuszeń elektrochem. (τ_s/τ_0)	Intensywność tribokorozji	
				zakres	średnia
[MPa]	[mV(SCE)]	[Hz]	[-]	[nm/s]	[nm/s]
wyniki badań					
1	100	5	0,10	0,2–0,4	0,3
12	100	5	0,10	4,7–5,6	5,2
45	100	5	0,10	14,5–16,5	16,1
45	100	2	0,25	6,0–7,0	6,6
12	700	5	0,14	3,2–4,2	3,7
45	700	5	0,14	10,8–11,9	11,4
wyniki obliczeń (przykładowe)					
12	100	3,5	0,14	–	3,6
45	100	3,5	0,14	–	11,6

W Tabeli 1 przedstawiono wyniki badań intensywności tribokorozji stali AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 w warunkach polaryzacji potencjałem z zakresu pasywnego. Skrajne wartości nacisków (1 i 45 MPa) oraz częstotli-

wości ruchu trzpienia (2 i 5 Hz) stosowane w testach z potencjałem polaryzacji 100 mV(SCE) przyjęto jako granice obszaru wymuszeń dla tworzonej mapy zużycia tribokorozyjnego. Mapę sporządzono na podstawie wyników symulacji zrealizowanych dla 5 wartości nacisków (1, 12, 23, 34 i 45 MPa) oraz 4 wartości częstotliwości ruchu trzpienia (2, 3, 4 i 5 Hz).

Na **Rys. 1** przedstawiono uzyskaną mapę zużycia. Prostokątami zaznaczono punkty odpowiadające wynikom eksperymentów. W przypadku węzła typu pin-on-plate z posuwisto-zwrotnym ruchem trzpienia średni czas między kolejnymi wymuszeniami stykowymi (τ_s) dla występów chropowatości powierzchni w środkowym odcinku drogi tarcia wynosi $\tau_s = 1/(2f)$.

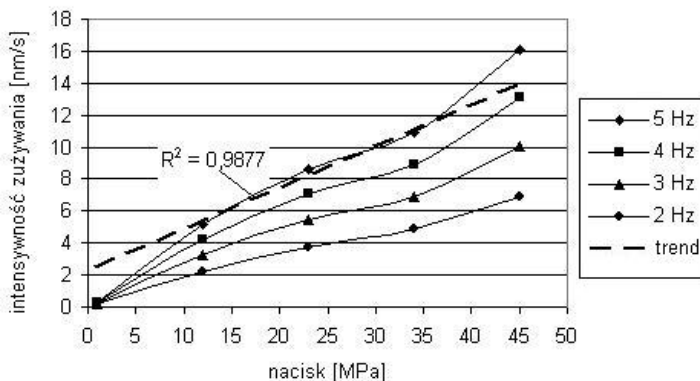


Rys. 1. Mapa zużycia dla tribokorozji (AISI 304, 0,5M H₂SO₄)

(■ – wynik eksperymentu)

Fig. 1. Wear map for tribocorrosion (AISI 304, 0,5M H₂SO₄)

(■ – result of experiment)



Rys. 2. Wpływ nacisku w strefie styku na intensywność zużycia

Fig. 2. Influence of pressure in contact area on the wear rate

Wzrost nacisków jednostkowych powoduje zwiększenie intensywności zużycia tribokorozyjnego w całym analizowanym zakresie częstotliwości ruchu trzpienia (**Rys. 2**). Dla każdej częstotliwości można wyodrębnić 3 zakresy nacisków o różnej tendencji zmian intensywności zużycia. W przedziale od 12 do 34 MPa występuje wyraźnie liniowa zależność między naciskiem i intensywnością zużycia. Dla zilustrowania tego faktu na wykresie przedstawiono (linią przerywaną) linię trendu wyznaczoną w analizowanym zakresie nacisków dla częstotliwości 5 Hz.

W przypadku skrajnych nacisków (1 i 45 MPa) obliczona intensywność zużycia wyraźnie różni się od wyniku prognozy według liniowego trendu dla zakresu 12–34 MPa. Przyczyną takiego stanu mogą być zróżnicowane warunki generowania prądu tribokorozji. W zakresie nacisków 12–34 MPa większość oddziaływań stykowych prowadzi do natychmiastowego oddzielenia – wskutek mikroskrawania – materiału próbki i odsłonięcia świeżej powierzchni, na której inicjowane są intensywne procesy elektrochemiczne (roztwarzanie, pasywacja). Rozmiary rzeczywistej powierzchni styku nie są jednak w tych warunkach na tyle duże, aby nastąpiło usunięcie warstwy pasywnych tlenków na całej szerokości drogi tarcia. Prąd tribokorozji zwiększa się stopniowo ze wzrostem nacisku, osiągając przy 34 MPa około 60% wartości maksymalnej odpowiadającej repasywacji na całej powierzchni wzdłuż drogi tarcia. Maksymalna wartość prądu tribokorozji osiągana jest przy nacisku 45 MPa. W tych warunkach gabaryty rzeczywistej powierzchni styku są już na tyle duże, że podczas ruchu posuwisto-zwrotnego trzpienia następuje usunięcie warstwy pasywnych tlenków na całej szerokości drogi tarcia. Testy wykonane dla nacisku 74 MPa nie wykazały znaczącego wzrostu prądu tribokorozji w porównaniu z wynikami testu dla 45 MPa mimo ponad 65% wzrostu intensywności zużycia. Osiągnięcie maksymalnej (dla danej geometrii styku) wartości prądu tribokorozji skutkuje znaczącym wzrostem intensywności ubytku materiału. Dla 1 MPa prąd tribokorozji jest przeciętnie o rząd wielkości mniejszy niż dla 12 MPa. Spowodowane jest to znacznie mniejszymi (12-krotnie) rozmiarami rzeczywistej powierzchni styku. Ponadto przy małych naciskach nie każde oddziaływanie stykowe występowanie chropowatości powierzchni musi prowadzić do natychmiastowego oderwania odkształcanego materiału (mikroskrawania). W wielu wypadkach może następować kumulacja odkształceń prowadząca do oddzielenia cząstki materiału dopiero po pewnej liczbie oddziaływań stykowych (wskutek zmęczenia). Rzadsze inicjowanie procesów elektrochemicznych na mniejszej powierzchni skutkuje znaczącym obniżeniem intensywności zużycia.

Tworząc mapę zużycia – zgodnie z koncepcją przedstawioną w pracach [L. 4, 5] – autorzy artykułu scharakteryzowali wymuszenia elektrochemiczne ilorazem (τ_s/τ_0) czasu między kolejnymi oddziaływaniami stykowymi (τ_s) i czasu repasywacji (τ_0). Prezentowana na **Rys. 1** mapa zużycia tribokorozyjnego została utworzona na podstawie wyników badań oraz obliczeń wykonanych

dla polaryzacji potencjałem 100 mV(SCE). W **Tabeli 1** zamieszczono również wyniki testów uzyskane dla wyższego potencjału polaryzacji: 700 mV(SCE). Przeprowadzone przez autorów badania procesu repasywacji stali AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 wskazują, że czas repasywacji dla potencjału 700 mV(SCE) wynosi około $\tau_0 = 0,714$ s i jest o 40% krótszy niż dla potencjału 100 mV(SCE) [L. 8]. Przy częstotliwości ruchu trzpienia 5 Hz dla potencjału polaryzacji 700 mV(SCE) parametr charakteryzujący wymuszenia elektrochemiczne wynosi $\tau_s/\tau_0 = 0,14$. Taka wartość parametru wymuszeń przy potencjale polaryzacji 100 mV(SCE) uzyskiwana jest przy częstotliwości ruchu trzpienia 3,5 Hz. W **Tabeli 1** zamieszczono wyniki obliczeń intensywności tribokorozji dla 100 mV(SCE) i 3,5 Hz. Uzyskane rezultaty są zbliżone (różnica nie przekracza 5%) do wyników badań przeprowadzonych przy potencjale polaryzacji 700 mV(SCE) i częstotliwości ruchu trzpienia 5 Hz (**Tabela 1**). Stwierdzona zgodność intensywności zużywania dla tej samej wartości parametru wymuszeń elektrochemicznych przy zróżnicowanym potencjale polaryzacji i częstotliwości ruchu wskazuje, że koncepcja bezwymiarowego parametru charakteryzującego wymuszenia elektrochemiczne – w postaci ilorazu (τ_s/τ_0) – dobrze odzwierciedla (na wybranym przykładzie: stal, środowisko, rodzaj węzła) wpływ potencjału polaryzacji na kinetykę procesów elektrochemicznych (repasywacji).

PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono koncepcję tworzenia map zużycia dla procesu tribokorozji w węźle ślizgowym. Zaprezentowano przykładową mapę charakteryzującą zużywanie stali AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 w warunkach polaryzacji potencjałem z zakresu pasywnego w skojarzeniu typu pin-on-plate.

Zastosowanie modelu symulacyjnego może wydatnie usprawnić tworzenie map zużycia. Narzędzie obliczeniowe pozwala wyznaczyć intensywność zużywania dla wartości wymuszeń pośrednich w stosunku do warunków eksperymentu badawczego. Wyniki takiej analizy umożliwiają wstępną identyfikację obszarów, w których następuje istotna zmiana relacji między warunkami wymuszeń i intensywnością ubytku materiału. Dla wstępnie zdiagnozowanego (przy pomocy modelu) zestawu wymuszeń można wykonać eksperyment weryfikacyjny. Zastosowanie modelu symulacyjnego umożliwia zatem sprawne planowanie badań nad wpływem wymuszeń na intensywność zużywania oraz tworzenie map zużycia.

Uzyskane mapy zużycia pozwalają określić wpływ warunków eksploatacji na intensywność usuwania materiału w węźle ślizgowym w warunkach tribokorozji. Konstruowanie map zużycia dla sparametryzowanych wymuszeń umożliwia ogólniejsze zastosowanie map dla fizycznie podobnych warunków eksploatacji.

LITERATURA

1. Ashby M.F., Lim S.C.: Wear-mechanism maps. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, vol. 24, s. 805–810.
2. Hutchings I.M.: Ductile-brittle transitions and wear maps for the erosion and abrasion of brittle materials. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1992, vol. 25, s. A212–A221.
3. Stack M.M., Corlett N., Zhou A.: A methodology for the construction of the erosion-corrosion map in aqueous environments. *Wear*, 1997, vol. 203, s. 474–488.
4. Stack M.M., Corlett N., Turgoose S.: Some recent advances in the development of theoretical approaches for the construction of erosion-corrosion maps in aqueous conditions. *Wear*, 1999, vol. 233–235, s. 535–541.
5. Jiang J., Stack M.M., Neville A.: Modelling the tribo-corrosion interaction in aqueous sliding conditions. *Tribology International*, 2002, vol. 35, s. 669–679.
6. 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.
7. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Verification of computational model for corrosive and mechanical wear. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 2009, vol. 44, nr 4, s. 28–36.
8. Stachowiak A., Zwierzycki W.: Wpływ warunków wymuszeń na zużywanie tribokorozyjne stali AISI 304 w 0,5M roztworze H_2SO_4 . *Tribologia*, 2011, nr 6, s. 211–218.

Summary

The article presents the concept of the creation of wear maps for the tribocorrosion process in pin-on-plate combination for stainless steel. The developed wear map shows the rate of tribocorrosion wear for AISI 304 steel in 0.5M solution of H_2SO_4 in the pressure range of 1 to 45 MPa and the frequency of mechanical forces from 2 to 5 Hz. For marginal forces, the wear intensities were calculated experimentally. The tests were carried out on a stand equipped with sliding pair type pin-on-plate. For estimation of intermediate values of forces, the authors devised and applied a simulation model. The developed wear map presents the influence of utilisation for the rate of material removal in sliding pairs under tribocorrosion conditions.